HOEPLI
TECNICA
PER LA SCUOLA

FAUSTO MARIA FERRI

CORSO DI **TECNOLOGIE E PROGETTAZIONE DI SISTEMI ELETTRICI ED ELETTRONICI**

Per l'articolazione **ELETTRONICA**
degli Istituti Tecnici
settore Tecnologico

3

RISORSE ONLINE

HOEPLI

FAUSTO MARIA FERRI

CORSO DI **TECNOLOGIE E PROGETTAZIONE DI SISTEMI ELETTRICI ED ELETTRONICI**

Per l'articolazione ELETTRONICA degli Istituti Tecnici
settore Tecnologico

VOLUME TERZO

EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO

UN TESTO PIÙ RICCO E SEMPRE AGGIORNATO
Nel sito **www.hoepliscuola.it** sono disponibili:
- materiali didattici integrativi;
- eventuali **aggiornamenti** dei contenuti del testo.

Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2012
Via Hoepli 5, 20121 Milano (Italy)
tel. +39 02 864871 – fax +39 02 8052886
e-mail hoepli@hoepli.it

www.hoepli.it

Tutti i diritti sono riservati a norma di legge
e a norma delle convenzioni internazionali

STRUTTURA DELL'OPERA

Il *Corso di Tecnologie e progettazione di sistemi elettrici ed elettronici* è destinato al secondo biennio (voll. 1 e 2) e al quinto anno (vol. 3) degli Istituti Tecnici settore Tecnologico. È articolato in **tre volumi** e rispetta nei suoi contenuti i nuovi programmi ministeriali del corso Tecnologie e progettazione di sistemi elettrici ed elettronici per l'articolazione **Elettronica**. Ogni volume è strutturato in **moduli didattici**, ordinati secondo un percorso didattico di progressivo affinamento delle capacità progettuali e al tempo stesso indipendenti per rendere possibile l'adozione di percorsi didattici differenziati, adatti al profilo delle singole classi e all'impostazione che l'insegnante intende dare al corso.

Le **esercitazioni** proposte partono da progetti di semplice esecuzione e diventano via via concettualmente più complesse e aderenti alle realtà professionali.

Contenuti del primo volume

Il primo volume, suddiviso in **dieci** moduli, ha l'obiettivo di:

- fornire competenze di base relative ai **dispositivi elettronici passivi e di progettazione** delle apparecchiature elettroniche digitali;
- saper utilizzare gli **strumenti di disegno e progettazione CAD**;
- saper **progettare impianti elettrici civili**, con particolare attenzione alle **normative** e alle problematiche legate alla **sicurezza**;
- approfondire la conoscenza di **economia e organizzazione aziendale** e delle principali teorie e strumenti per la gestione dei processi aziendali utilizzando **strumenti di pianificazione informatici**.

Contenuti del secondo volume

Il secondo volume, suddiviso in **sette** moduli, approfondisce lo studio:

- delle competenze di base relative ai **dispositivi elettronici attivi e di progettazione** delle apparecchiature elettroniche digitali e analogiche;
- dei **microprocessori**, **microcalcolatori**, **controllori programmabili** e le loro principali applicazioni (domotica, sistemi SCADA);
- dell'**ingegnerizzazione dei progetti elettronici**, analizzando i principali metodi applicati nella progettazione e realizzazione dei circuiti stampati utilizzando strumenti informatici (CAD);
- degli aspetti di progettazione legati alla **sicurezza**, alla **qualità** e alla **manutenzione** di un prodotto elettronico.

Contenuti del terzo volume

Il terzo volume, suddiviso in **quattordici** moduli, ha l'obiettivo di:

- fornire le competenze di base sui principali **trasduttori e attuatori** utilizzati nelle apparecchiature elettroniche;
- acquisire competenze nelle tecniche di ingegnerizzazione del progetto delle apparecchiature elettroniche;
- approfondire la conoscenza degli **aspetti progettuali** delle apparecchiature elettroniche analogiche e digitali considerando le esigenze ambientali, di innovazione, di costo e di marketing;
- saper valutare i **costi aziendali** e determinare il **prezzo di vendita dei prodotti**, in particolare di quelli elettronici;
- conoscere i principali **contratti di lavoro**, **diritti, doveri e tutele dei lavoratori**, le principali norme di **sicurezza sul lavoro**.

GUIDA GRAFICA AL TESTO

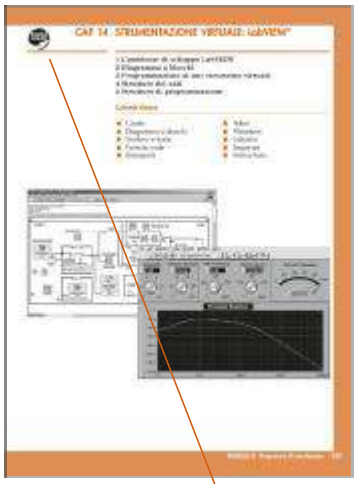
MODULI

Il testo del **terzo volume** è strutturato in **14 moduli** completi e indipendenti, suddivisi in **capitoli**.
All'apertura di ogni modulo sono evidenziati i **prerequisiti** e gli obiettivi di **conoscenze** e **competenze** che fondano il suo studio.
Alla fine del modulo viene proposta la **sintesi degli argomenti** che sono stati sviluppati.
Il modulo termina con le **verifiche**.

CAPITOLI

Il capitolo inizia con il richiamo dei **concetti chiave**. Il testo è corredato di note a margine che spiegano le **sigle** e i termini scientifici e tecnici (**glossario**). **Disegni**, **fotografie**, **estratti da cataloghi** e **tabelle** riassuntive dei dati fondamentali migliorano la comprensione e la memorizzazione; gli **esempi** traducono la teoria in pratica dei problemi e del calcolo. Le parti dedicate alle conoscenze fondamentali sono accompagnate da **schede di applicazioni** con **esercitazioni** finali. Alla fine dei paragrafi più significativi del capitolo, un elenco di **domande** aiuta l'autoverifica dell'apprendimento.

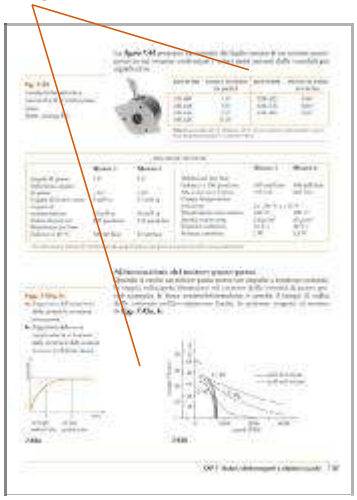
COMPLETA IL VOLUME un accurato **indice analitico** fondamentale e rapido strumento di ricerca degli argomenti trattati.

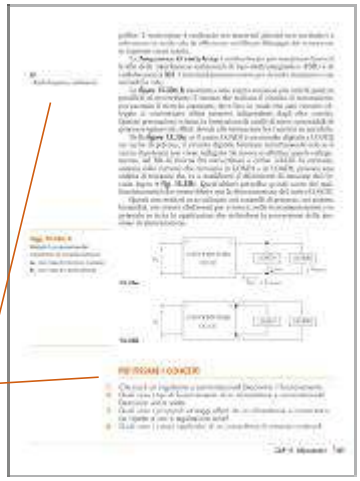


collegamento al sito Internet

apertura modulo

disegni e tabelle dei dati tecnici

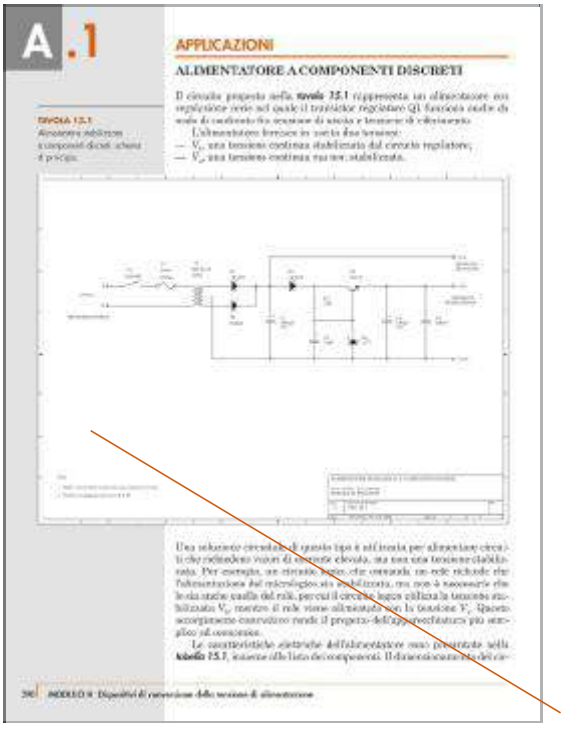




apertura di capitolo
e concetti chiave

acronimi
e domande
di autoverifica

indice analitico


A.1
APPLICAZIONI
ALIMENTATORE A COMPONENTI DISCRETI

schede di applicazioni

CONTENUTI DEL TERZO VOLUME

Nel sito **www.hoepliscuola.it** sono disponibili:

- i testi dei capitoli: Realizzazione tecnologica dei tiristori, dei diodi led, dei diodi laser e dei fotodiodi; Sistemi per la trasmissione dei segnali; Tecniche di fabbricazione dei microcircuiti; Circuiti micrologici digitali; Programmi di verifica e simulazione dei sistemi digitali e analogici: Spice; Strumentazione virtuale: LabView; Applicazioni dei sistemi digitali; La qualità nell'impresa; Esercitazioni e applicazioni di elettronica digitale e analogica;
- testi di approfondimento, in particolare: Linguaggi di programmazione C e C++; Firma digitale; Specializzazione dei componenti elettronici; Introduzione al rumore; Operazioni di sorveglianza relative agli estintori;
- disegni e software sviluppato nel testo;
- tabelle tecniche;
- set delle istruzioni dei microprocessori trattati nel testo;
- elenco dei siti Internet delle principali aziende produttrici di dispositivi e apparecchiature elettroniche;
- link di collegamento ai fogli tecnici e alle note applicative dei principali dispositivi elettronici;
- glossario;
- acronimi utilizzati nel testo;
- bibliografia.

ESEMPIO 2

esempi applicativi

collegamento al sito Internet

SINTESI DEL MODULO C

sintesi degli argomenti del modulo

MODULO III VERIFICHE

verifiche di fine modulo

Indice

MODULO A

Trasduttori per applicazioni elettroniche 1

CAP 1 Trasduttori 2
1. Caratteristiche di funzionamento 3
2. Trasduttori di posizione 7
3. Trasduttori di velocità e di accelerazione 23
4. Sensori di prossimità 27
5. Trasduttori di pressione 31
6. Trasduttori di temperatura 32
7. Trasduttori di livello 39
8. Trasduttori per misure di flusso 41
9. Sensori a fibre ottiche 43
10. Sensori sensibili al fumo, ai gas di combustione, alle fiamme 45
11. Sensori intelligenti 48
12. Circuiti per l'elaborazione dei segnali generati dai trasduttori 50

SINTESI DEL MODULO 55
VERIFICHE 57

MODULO B

Dispositivi elettronici di potenza 58

CAP 2 Transistor bipolare in commutazione 59
1. Transistor bipolare in commutazione 61
2. Transistor MOS in commutazione 65

CAP 3 Tiristori 67
1. SCR 67
2. Diac 77
3. Triac 78
4. GTO 83
5. Circuiti applicativi dei tiristori 87

SINTESI DEL MODULO 95
VERIFICHE 97

MODULO C

Dispositivi optoelettronici 98

CAP 4 Fotoemettitori 99
1. Diodi led 99
2. Display 106
3. Visualizzatori a scarica 1 18
4. Diodi laser 120

CAP 5 Fotorivelatori 133
1. Fotodiodi 134
2. Celle fotovoltaiche 138
3. Fototransistor 141
4. Fototiristori 144
5. Fotoaccoppiatori 146

CAP 6 Sistemi per la trasmissione dei segnali 154

SINTESI DEL MODULO 155
VERIFICHE 158

MODULO D

Dispositivi di conversione dell'energia elettromeccanica 159

CAP 7 Motori, elettromagneti e attuatori acustici 160
1. Motori elettrici 160
2. Motori in corrente continua 162
3. Motori in corrente alternata 177
4. Motori universali e motori lineari 180
5. Motori passo-passo 181
6. Elettromagneti 189
7. Attuatori acustici 190

SINTESI DEL MODULO 193
VERIFICHE 194

MODULO E

Microcircuiti 195

CAP 8 Circuiti integrati monolitici 196
1. Componenti micrologici 196

CAP 9 Circuiti micrologici digitali 202
SINTESI DEL MODULO 203
VERIFICHE 204

MODULO F
Circuiti integrati per applicazioni specifiche 205

CAP 10 Dispositivi logici programmabili e a mascheratura 206
1. Dispositivi logici programmabili 208
2. Dispositivi logici a mascheratura 215

CAP 11 Programmazione dei pld 219
1. Software di programmazione 219
2. Linguaggi di programmazione 222
3. Simulazione di un PLD 248
SINTESI DEL MODULO 254
VERIFICHE 255

MODULO G
Programmi di simulazione 256

CAP 12 Programma di verifica e simulazione dei sistemi digitali

CAP 13 Simulazione dei sistemi analogici e digitali: Spice®

CAP 14 Strumentazione virtuale: LabVIEW®

SINTESI DEL MODULO 260

MODULO H
Dispositivi di conversione della tensione di alimentazione 262

CAP 15 Alimentatori 263
1. Alimentatori lineari 263
2. Regolatori integrati 274
3. Alimentatori a commutazione 280
4. Confronto tra alimentatori lineari e alimentatori a commutazione 286
5. Convertitori di corrente continua (DC/DC) 286
Applicazioni 290
SINTESI DEL MODULO 303
VERIFICHE 304

MODULO I
Conversione analogico-digitale e digitale-analogico 305

CAP 16 Convertitori 306
1. Convertitori D/A 307
2. Convertitori A/D 312
3. Convertitori tensione/frequenza e frequenza/tensione 318
Applicazioni 322
SINTESI DEL MODULO 331
VERIFICHE 332

MODULO J
Progettazione delle apparecchiature elettroniche: qualità e limiti di funzionamento 333

CAP 17 Metodi di progetto 334
1. Limiti meccanici e termici di funzionamento 335
2. Affidabilità del progetto 336
3. Collaudo e messa a punto 338
4. Metodi di realizzazione 341
5. Documentazione di un'apparecchiatura elettronica 349
6. Scelta della categoria di rischio dell'attrezzatura 351
7. Valutazione dei costi e determinazione del prezzo di vendita 353
SINTESI DEL MODULO 356
VERIFICHE 357

MODULO K
Ingegnerizzazione del progetto 358

CAP 18 Circuiti analogici di potenza 359

CAP 19 Microcalcolatori 360
1. Criteri per la selezione di un microcalcolatore 360
2. Metodi di programmazione dei microcontrollori PIC 362
3. Microcalcolatore PIC16F628 364
4. Contatore di programma 371
5. Port di ingresso e uscita 372
6. Periferiche 373
7. Funzioni speciali 384

8. Scheda di sviluppo per PIC16F628 388
9. Microcalcolatore PIC16F877 390

CAP 20 Applicazioni dei circuiti digitali 396

SINTESI DEL MODULO 397
VERIFICHE 399

MODULO L
Elettronica ed ecologia 400

CAP 21 Rifiuti elettronici 401
1. Sistema di gestione dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) 402
2. Marcatura dei prodotti 409
3. Restrizioni all'uso di sostanze pericolose nella costruzione di vari tipi di apparecchiature elettriche ed elettroniche 410
SINTESI DEL MODULO 412
VERIFICHE 413

MODULO M
Diritto del lavoro 414

CAP 22 Contratti di lavoro 415

CAP 23 Lo statuto dei lavoratori (Legge 300/1970) 422

CAP 24 Il diritto di sciopero 426

CAP 25 La tutela previdenziale dei lavoratori 428
1. Le prestazioni dell'Inps 428
2. Le prestazioni dell'Inail 430
3. Gli aspetti fiscali della retribuzione 431
4. La cessazione del rapporto di lavoro 432
5. Trattamento di fine rapporto lavoro 433

CAP 26 La sicurezza sul lavoro 434
1. Il servizio di prevenzione e protezione dai rischi 434
2. Piano di emergenza 441
3. Segnaletica di sicurezza 448
4. Pronto soccorso aziendale 448
5. Il mobbing 451
6. Il Codice della privacy e le misure minime di sicurezza 452
SINTESI DEL MODULO 457
VERIFICHE 460

MODULO N
Economia aziendale e marketing 461

CAP 27 Il bilancio di esercizio 462
1. Contabilità 463
2. La metodologia di rilevazione 466
3. Piano dei conti 469
4. Ciclo di bilancio 469
5. Contabilità analitica 474
6. Costi variabili e costi fissi 475
7. Determinazione del prezzo di vendita 477

CAP 28 Marketing 481
1. Concetto di marketing 481
2. La promozione vendite 487

CAP 29 La qualità nell'impresa 499

SINTESI DEL MODULO 500
VERIFICHE 502

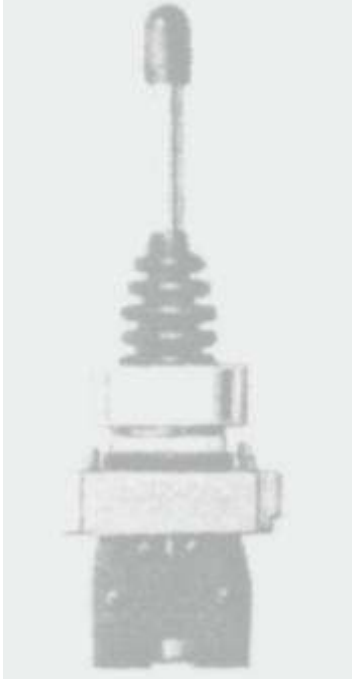
Indice analitico 503

MODULO A

Trasduttori per applicazioni elettroniche

CAP 1

TRASDUTTORI



Prerequisiti

- Principali grandezze elettriche.
- Comportamento dei campi magnetici.
- Principali caratteristiche meccaniche e termiche dei materiali.
- Comportamento dei materiali al variare della temperatura.

Obiettivi

Conoscenze

- Principi di funzionamento dei trasduttori più utilizzati nell'automazione industriale.
- Correlazione tra fenomeni fisici e chimici e comportamento dei sensori.

Competenze

- Saper scegliere i trasduttori adatti in funzione della grandezza da misurare.
- Saper interpretare i parametri caratteristici di ogni trasduttore.
- Saper interfacciare i trasduttori con le apparecchiature analogiche e digitali.

CAP 1 TRASDUTTORI

Concetti chiave

- Isteresi
- Funzione di trasferimento
- Metodo potenziometrico
- Metodo a ponte di Wheatstone
- Risoluzione
- Sensibilità

1 Caratteristiche di funzionamento
2 Trasduttori di posizione
3 Trasduttori di velocità e di accelerazione
4 Sensori di prossimità
5 Trasduttori di pressione
6 Trasduttori di temperatura
7 Trasduttori di livello
8 Trasduttori per misure di flusso
9 Sensori a fibre ottiche
10 Sensori sensibili al fumo, ai gas di combustione, alle fiamme
11 Sensori intelligenti
12 Circuiti per l'elaborazione dei segnali generati dai trasduttori

Il **trasduttore** (anche detto **sensore**) è un qualsiasi dispositivo che opera una conversione di una forma di energia in un'altra, diversa, della quale è nota la relazione fra grandezza fisica di ingresso e grandezza di uscita, in modo che dalla conoscenza dell'uscita si può desumere una misura dell'ingresso.

I trasduttori per applicazioni elettroniche trasformano una grandezza fisica (posizione, forza, velocità, pressione, temperatura) in una grandezza fisica elettrica (tensione, corrente) allo scopo di permetterne la misura o il controllo.

I trasduttori vengono impiegati in tutti i settori produttivi per cui, per scegliere quello più adatto a una certa applicazione, si deve avere una conoscenza completa dei vari tipi di sensori e delle loro principali caratteristiche, sia tecnologiche sia elettriche.

I principali tipi di segnali di ingresso e le grandezze che possono essere misurate sono:

— spostamenti lineari (lunghezze, spessori, livelli, vibrazioni, forze, deformazioni, stato delle superfici, usura ed erosione superficiale);
— spostamenti angolari (vibrazioni, rotazioni relative);
— velocità lineari (momenti, portate, vibrazioni);
— velocità angolari (momenti angolari, frequenza di rotazione);
— accelerazioni lineari (urti, vibrazioni);
— accelerazioni angolari (momenti di inerzia, urti obliqui);
— forze (pressioni, pesi, velocità e portate di fluidi e gas, sforzi, urti);
— temperatura (conduzione e radiazione del calore, pressioni, velocità di un gas);
— radiazione luminosa (flusso e densità luminosa, lunghezze, frequenze, distribuzioni spettrali);
— intervalli di tempo (frequenza, velocità).

I parametri elettrici che possono essere variati dallo stimolo fisico applicato in ingresso sono:

— resistenza;
— capacità;
— induttanza;
— alcune combinazioni delle precedenti per produrre una corrente, una tensione (a corrente continua o alternata) o una frequenza.

1 CARATTERISTICHE DI FUNZIONAMENTO

Nella quasi totalità dei casi l'informazione fornita dai trasduttori è di tipo analogico, cioè la grandezza elettrica in uscita varia con continuità nel tempo. Nei sistemi digitali, il segnale in uscita dei trasduttori viene prelevato a intervalli di tempo predefiniti, tali da conservare l'informazione in essi contenuta: secondo il teorema del campionamento, la frequenza dei campionamenti dev'essere maggiore del doppio della frequenza massima contenuta nel segnale prodotto dal trasduttore.

L'informazione ottenuta si presenta sotto forma di una serie di impulsi di ampiezza variabile. Il segnale è quindi analogico in ampiezza e discreto nel tempo. Per essere utilizzato da sistemi digitali, esso deve però diventare di tipo discreto anche in ampiezza; l'operazione che permette di effettuare questa trasformazione è detta **quantizzazione** e consiste nell'assegnare un codice numerico binario a un intervallo di valori della grandezza di uscita.

Il numero di bit utilizzato per la trasformazione e, quindi, il numero di stati di uscita ottenibili, fornisce un indice della qualità dell'operazione di discretizzazione (**risoluzione**). È evidente che quanto più grande è il numero di bit impiegato, tanto più piccola è l'ampiezza di quantizzazione analogica, cioè il campo dei valori analogici che forniscono lo stesso valore binario.

La **funzione di trasferimento** di un trasduttore, cioè la relazione fra la grandezza di uscita e quella in ingresso, può essere di tipo lineare o non lineare. Si possono considerare dispositivi lineari anche i non lineari limitando il campo di variazione delle grandezze in ingresso ai valori rispetto a cui la relazione ingresso-uscita ha un comportamento lineare.

Un qualsiasi trasduttore inserito nel circuito di misura influenza la grandezza elettrica di uscita in funzione del segnale di ingresso, ma viene a sua volta fortemente influenzato da tutte le condizioni ambientali (temperatura, pressione, umidità), dai disadattamenti di impedenza, dalle variazioni dovute al suo invecchiamento e dall'alterazione delle sue caratteristiche fisico-chimiche. È quindi evidente che, nella scelta del trasduttore, vanno valutate attentamente anche le caratteristiche dell'ambiente in cui esso opererà.

Ogni trasduttore, quando preleva informazioni da un sistema, lo disturba perché lo priva di una certa quantità di energia. Un trasduttore è detto **attivo** quando trasferisce quest'energia, diminuita delle perdite interne, in uscita (come nel caso, per esempio, dei trasduttori piezoelettrici); è detto **passivo** quando necessita, per funzionare, di una sorgente ausiliaria di energia (come nel caso, per esempio, dei potenziometri).

Per ogni trasduttore viene fornito:

— il **campo di misura** (o **portata**), cioè il campo di variazione della grandezza in ingresso dato dalla differenza ($U_M - U_m$) fra il valore massimo (U_M) e quello minimo (U_m) entro cui si ha un corretto comportamento;
— il **campo di variazione dei valori massimi** della grandezza elettrica in uscita;
— la **risoluzione**, cioè la minima variazione della grandezza in ingresso che provoca una variazione della grandezza in uscita.

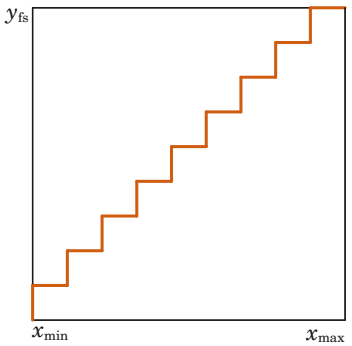


Fig. 1.1
Caratteristica di trasferimento a gradini di un trasduttore di posizione realizzato con un potenziometro a filo.

Alcuni trasduttori, come quelli di posizione realizzati con potenziometri a filo, presentano una caratteristica di trasferimento a gradini come quella mostrata nella ***figura 1.1***; l'uscita mantiene, per un certo intervallo di variazione, un valore costante del segnale di ingresso. Nei trasduttori digitali il potere risolutivo dipende dal numero di bit utilizzato per codificare l'uscita (per esempio, un encoder a 8 bit permette di discriminare: $2^8 = 256$ posizioni diverse).

I principali parametri che permettono di valutare le prestazioni di un trasduttore sono:
— la funzione di trasferimento;
— il guadagno;
— l'errore di guadagno;
— la linearità;
— la sensibilità;
— la precisione (o ripetitività);
— l'isteresi (o ripetibilità);
— l'offset (fuori zero) di uscita;
— la risposta in frequenza;
— le caratteristiche dinamiche.

La **funzione di trasferimento** esprime la relazione fra la grandezza di uscita del trasduttore e la grandezza di ingresso da misurare; la relazione può essere espressa mediante un'espressione matematica, una curva teorica o sperimentale, una tabella di dati.

Il **guadagno** K (costante di trasduzione) è dato dalla pendenza nominale della retta ideale del trasduttore.

L'**errore di guadagno** è dato dalla differenza fra il comportamento ideale (K_i) e quello reale (K) del trasduttore. Viene espresso in valore percentuale:

$$\Delta K\% = \frac{K_i - K}{K} \times 100 \qquad 1.1$$

La **linearità** è un indice che misura in che modo il trasduttore segue la curva di calibrazione ideale; viene espressa, di solito, come percentuale del valore di fondo scala. I trasduttori reali non hanno comportamento lineare: non forniscono uguali variazioni della grandezza di uscita per uguali variazioni dei segnali di ingresso.

La **sensibilità** è data dal rapporto fra la variazione della grandezza di uscita e la corrispondente variazione della grandezza fisica di ingresso; è costante solo se la caratteristica di uscita del trasduttore è lineare. I valori riportati sui fogli tecnici sono riferiti ai punti della caratteristica in cui la linearità è costante.

La **precisione** è un indice della **ripetitività** della misura, cioè della sua affidabilità nel tempo. In presenza dello stesso stimolo, in tempi diversi, il trasduttore dovrebbe generare la stessa tensione di uscita. Viene espressa, di solito, come percentuale del valore di fondo scala. Il segnale di uscita di alcuni trasduttori può assumere valori diversi anche in presenza di un segnale di ingresso identico. Ciò avviene in quanto, per questi sensori, il valore del segnale di uscita dipende, oltre che dal valore assoluto del segnale di ingresso, anche dal modo in cui il segnale è perve-

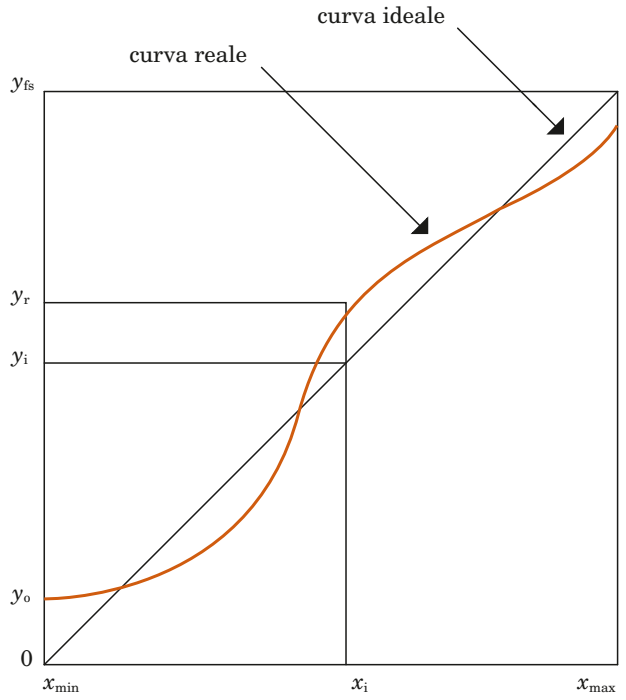
nuto a tale valore, e cioè se il segnale vi è giunto partendo da un valore inferiore o da un valore superiore. La differenza fra i due valori viene detta **isteresi** del trasduttore (**ripetibilità**).

L'**offset** è dato dal valore di uscita del trasduttore (ΔY_o) quando il valore della grandezza di ingresso è nulla (▸ ***Fig. 1.2***); l'errore di offset è facilmente eliminabile con un circuito di condizionamento adeguato.

Fig. 1.2
Errore di linearità.

errore di linearità: $L = \frac{y_r - y_i}{y_{fs}} \times 100$

y_o offset
y_{fs} fondo scala



La **risposta in frequenza** del trasduttore fornisce informazioni sul suo comportamento dinamico. Se la frequenza di risposta è bassa, essa non riproduce esattamente le variazioni della grandezza che si sta misurando perché vengono perse le informazioni ad alta frequenza. D'altra parte, una risposta troppo ampia permette il passaggio anche di segnali ad alta frequenza (in genere disturbi) che non appartengono al contenuto informativo della grandezza che si sta misurando, provocando ugualmente la propagazione di errori nella catena di misura.

Le **caratteristiche dinamiche** del trasduttore ne descrivono il comportamento quando la grandezza da misurare varia rapidamente. Sono espresse da parametri quali la costante di tempo, il tempo di risposta o di salita, sia sotto forma numerica sia mediante curve sperimentali.

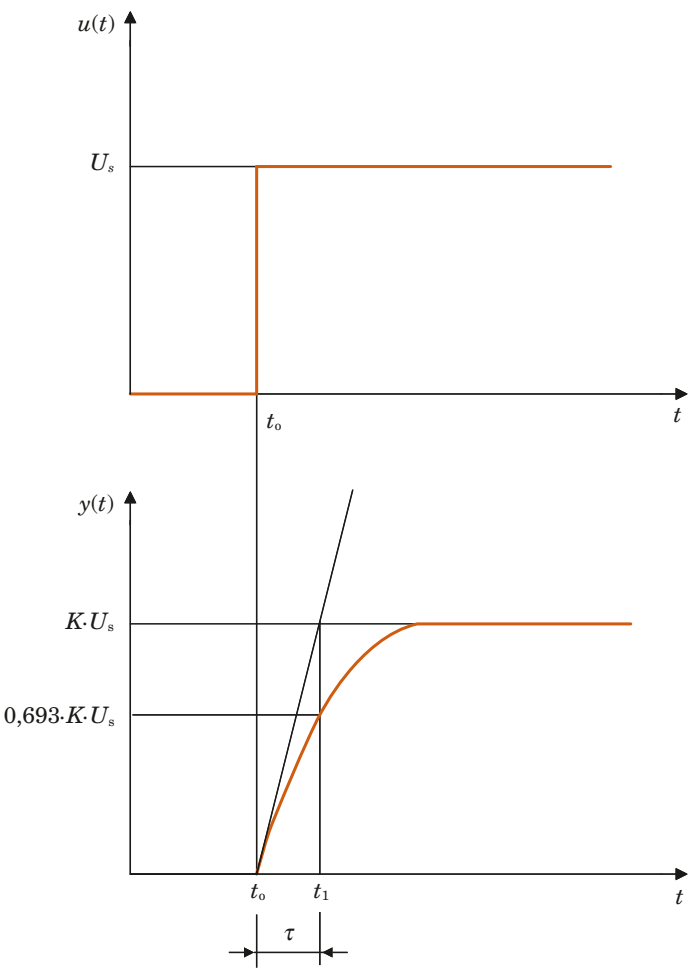
Una variazione del segnale di ingresso ($K \cdot U(t)$ non determina il cambiamento istantaneo dell'uscita $Y(t)$ di un trasduttore: tra l'una e l'altro deve trascorrere un intervallo di tempo che in teoria è infinito, ma in pratica è sufficiente che sia almeno pari a $4 \div 5$ volte la costante di tempo (τ) del trasduttore. È quindi necessario conoscere il valore della **costante di tempo** di un trasduttore, che in effetti costituisce una misura dell'inerzia del sistema.

Il costruttore fornisce in genere il valore della costante di tempo misurata in condizioni ideali: cioè quello che si ottiene utilizzando in

ingresso un generatore di potenza infinita, in modo che il trasduttore non alteri la grandezza da misurare. La costante di tempo viene definita facendo riferimento all'evoluzione caratteristica di un sistema di primo ordine soggetto a una sollecitazione a gradino della grandezza di ingresso (▸ ***Fig. 1.3***).

Fig. 1.3
Definizione di costante di tempo

τ costante di tempo



La costante di tempo limita la frequenza massima di variazione del segnale ingresso (f) al seguente valore:

$$f \leq \frac{1}{4 \div 5 \cdot \tau} = f_o \qquad \textbf{1.2}$$

dove:

f_o è la massima frequenza del trasduttore che, se opera anche in continua, corrisponde anche alla sua **banda passante**.

I sensori vengono fissati all'apparecchiatura, o al dispositivo oggetto della misura, con:
— un collante, soluzione semplice ed economica;

— un montaggio magnetico; il contenitore del dispositivo che si sta misurando deve avere proprietà magnetiche e il campo magnetico non deve disturbare la misura;
— una filettatura unificata ricavata sul contenitore del sensore.

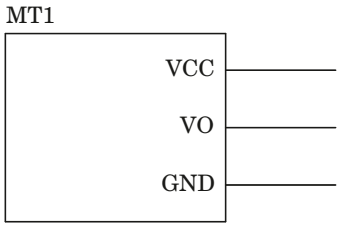


Fig. 1.4
Simbolo grafico del trasduttore generico.

Simbolo grafico

I trasduttori, soprattutto quelli di uso più comune e fabbricati da più tempo (come i microfoni, le termocoppie, il trasformatore differenziale, la dinamo tachimetrica), hanno generalmente un simbolo grafico proprio.

Quando non ha il proprio simbolo normalizzato, si rappresenta il trasduttore con un rettangolo. Tutti i segnali che il trasduttore scambia con l'ambiente esterno vanno chiaramente identificati. Nel rettangolo, o nella sua prossimità, dev'essere chiaramente indicata la grandezza misurata (▸ ***Fig. 1.4***).

La sigla di identificazione del trasduttore generico è la MT.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Che cos'è un trasduttore?
2. Quali sono le grandezze che caratterizzano un trasduttore?
3. Che cos'è la funzione di trasferimento di un trasduttore?
4. Che cos'è la risoluzione di un trasduttore?
5. Come si valuta la linearità di un trasduttore?
6. L'affermazione circa la maggiore precisione di un trasduttore rispetto a un altro, quale tipo di valutazione coinvolge?
7. Che cosa significa l'affermazione: "Questo sensore è molto sensibile!"?

2 TRASDUTTORI DI POSIZIONE

Questi trasduttori convertono uno spostamento rettilineo o un angolo di rotazione in variazione di una grandezza elettrica.

I trasduttori di posizione più diffusi sono:
— i potenziometri resistivi;
— i trasduttori capacitivi;
— i trasduttori, o potenziometri, induttivi;
— i trasformatori differenziali;
— gli estensimetri;
— i trasduttori di posizione angolare (*encoder*).

Potenziometri resistivi

Questi trasduttori possiedono un elemento resistivo su cui scorre un contatto (**cursore**) mobile; il movimento relativo del cursore può essere **rettilineo**, **rotatorio**, **elicoidale** (multigiri). Sono trasduttori passivi e quindi richiedono l'uso di una sorgente ausiliaria di alimentazione che, in funzione del tipo di elaborazione da effettuare sul segnale in uscita, può essere a tensione continua o alternata.

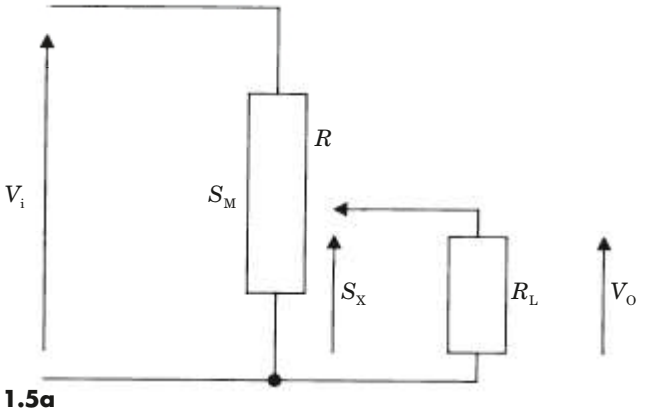
Nel caso ideale, la **funzione di conversione** (o **di trasferimento**)

è lineare (▸ ***Figg. 1.5a, b, c***). La resistenza interna del dispositivo di misura è posta in parallelo all'elemento resistivo di partizione del potenziometro per cui, se è di basso valore, altera la curva di trasferimento del trasduttore il cui comportamento diventa non lineare. La funzione di conversione vale:

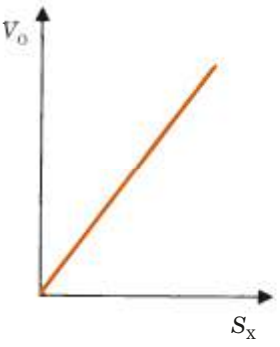
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\frac{S_M}{S_X} + \frac{R}{R_L}\left(1 - \frac{S_X}{S_M}\right)} \qquad 1.3$$

dove :

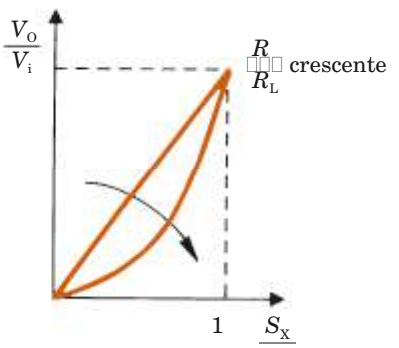
S_M è lo spostamento massimo del cursore
S_X è lo spostamento del cursore da misurare
R è la resistenza del potenziometro (ohm)
R_L è la resistenza di ingresso dello strumento di misura (ohm)



1.5a



1.5b



1.5c

Figg. 1.5a, b, c
Funzione di conversione di un trasduttore potenziometrico:
a. schema di principio;
b. curva di trasferimento ideale;
c. curva di trasferimento reale.

La caratteristica di uscita in funzione dello spostamento di un potenziometro reale segue l'andamento mostrato nella ***figura 1.6***, dove le deviazioni dalla linea retta ideale rappresentano la misura dell'imprecisione del potenziometro rispetto alla linearità.

I potenziometri utilizzati come trasduttori devono essere di precisione e possedere una linearità dello 0,1% (in qualche caso anche dello 0,01%). Ciò comporta che per ogni posizione angolare dell'albero del potenziometro, la massima differenza fra la tensione di uscita effettiva e quella idea-

le, corrispondente a una variazione perfettamente rettilinea, non superi lo 0,1% (o lo 0,01%).

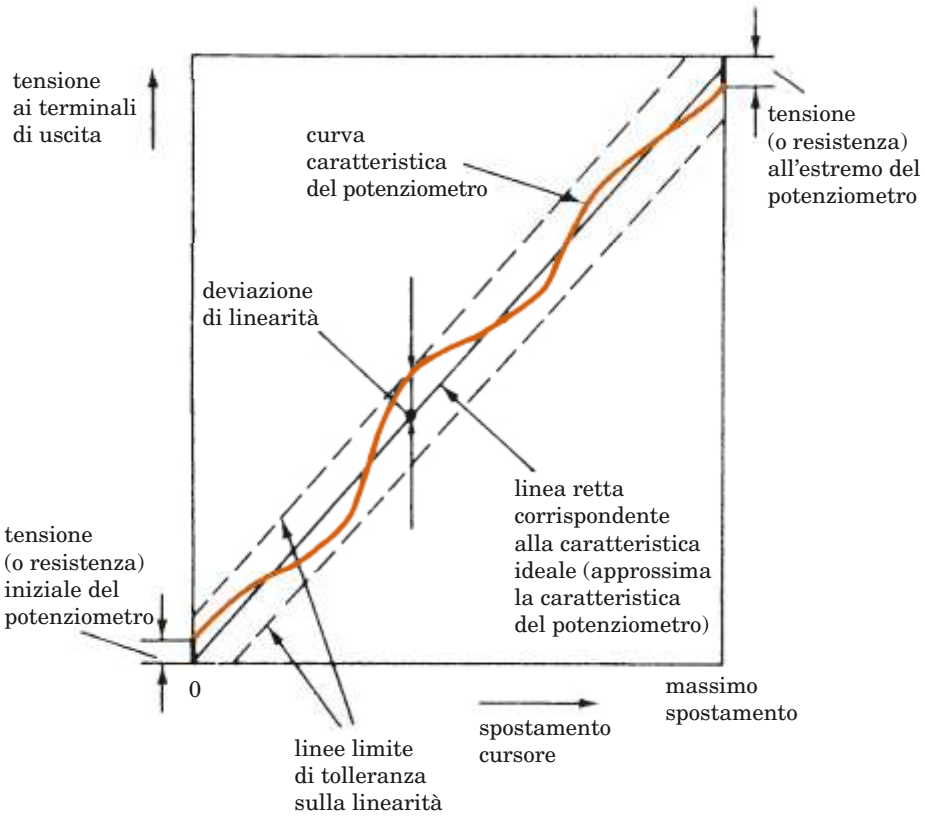


Fig. 1.6
Caratteristica di uscita di un potenziometro in funzione dello spostamento angolare.

Nei **potenziometri di precisione a filo**, dove l'elemento resistivo è realizzato con un filo conduttore avvolto su cui scorre il contatto del cursore, la resistenza varia a gradini per effetto del salto del contatto da una spira alla successiva. In corrispondenza del movimento di rotazione angolare dell'albero di ingresso, la minima variazione a gradino della resistenza (o della tensione di uscita) è la misura della risoluzione del potenziometro. Il valore della risoluzione è dato dal reciproco del numero di spire totali espresso in percentuale (%), e dipende dal numero di spire per unità di lunghezza.

La ***figura 1.7*** mostra un tipico trasduttore potenziometrico.

Fig. 1.7
Forma costruttiva di un potenziometro di precisione.

I potenziometri non vengono utilizzati molto spesso come trasduttori per servomeccanismi di macchine utensili perché le possibili alterazioni sul contatto strisciante, provocate da eventuali vibrazioni della macchina e dal pulviscolo esistente nell'ambiente, impregnato di particelle metalliche, li rendono poco affidabili.

Trasduttori capacitivi

Questi trasduttori sono di tipo passivo e sono formati da condensatori.

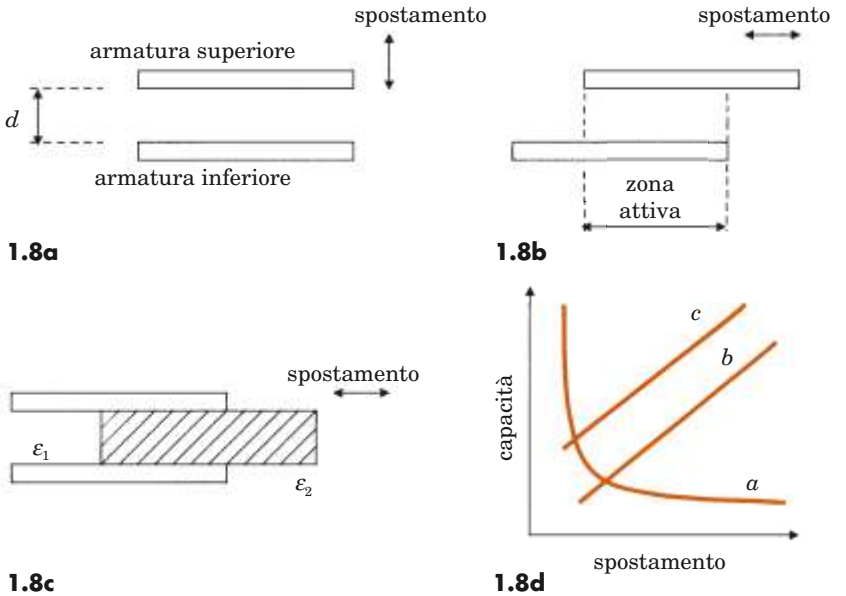
La capacità di un condensatore piano dipende dalla superficie delle due armature e dalla costante dielettrica del materiale isolante (dielettrico) interposto fra di esse; è inversamente proporzionale alla loro distanza:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}$$

dove:

C è la capacità
ε è la costante dielettrica del materiale isolante
S è l'area della superficie delle armature
d è la distanza fra le armature

I trasduttori di tipo capacitivo sfruttano la possibilità di cambiare il valore della capacità agendo in uno dei modi seguenti (▸ ***Figg. 1.8a-d***):
— spostando, applicando una forza esterna, un'armatura rispetto all'altra, e quindi variando il parametro d;
— ruotando, o spostando, una delle due armature, e quindi variando il parametro S;
— interponendo fra le armature un dielettrico di costante dielettrica ε diverso dal materiale già presente.



Figg. 1.8a-d
Trasduttori capacitivi:
a. variazione della distanza fra le armature;
b. variazione della superficie delle armature;
c. variazione della costante dielettrica;
d. curve caratteristiche.

La relazione tra spostamento e capacità è lineare se variano la costante dielettrica e la superficie del condensatore, è non lineare (iperbole) se varia la distanza fra le armature.

La massima variazione di capacità ottenibile è dell'ordine di qualche decina di picofarad. Gli spostamenti misurabili sono piccoli (pochi micrometri) nei trasduttori che prevedono lo spostamento relativo delle armature, ma possono essere anche di alcuni millimetri negli altri due tipi.

La misura della variazione può interessare la capacità vera e propria o la reattanza capacitiva. Un metodo per misurare la variazione della reattanza capacitiva richiede l'inserimento delle capacità variabili in un ponte di misura (ponte di DeSauty) alimentato in corrente alternata (▸ ***Fig. 1.9***). Con un altro metodo la capacità variabile viene inserita nel circuito risonante di un oscillatore, per cui la variazione di capacità si trasforma in una variazione di frequenza.

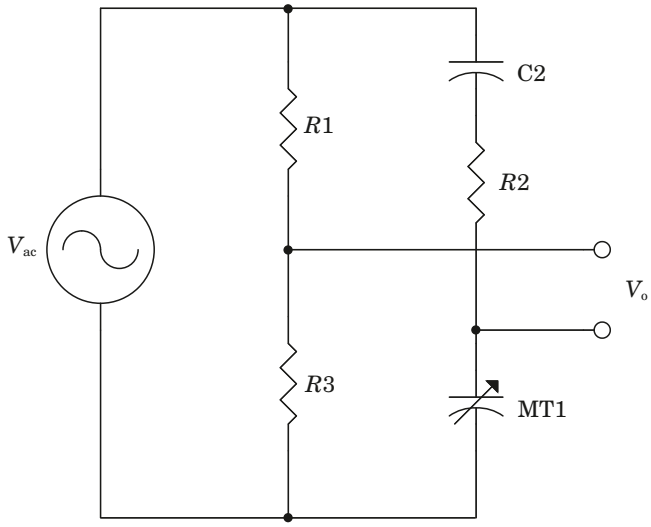


Fig. 1.9
Circuito di misura per un trasduttore capacitivo (ponte di DeSauty).

Trasduttori induttivi

I trasduttori o **potenziometri induttivi** effettuano la trasformazione della grandezza fisica in elettrica nel modo già illustrato per i trasduttori capacitivi.

Il **potenziometro induttivo toroidale**, alimentato in corrente alternata, funziona da autotrasformatore a prese di precisione (▸ ***Fig. 1.10***). L'albero rotante di ingresso è collegato a una spazzola strisciante che collega le prese dell'avvolgimento primario (avvolto su un toroide) al circuito di uscita. Una maggiore affidabilità si ottiene sostituendo la spazzola con una serie di interruttori ausiliari.

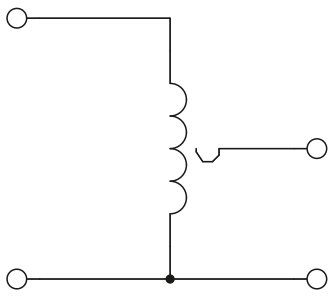


Fig. 1.10
Potenziometro induttivo toroidale.

Il principale vantaggio offerto dal potenziometro induttivo è la sua maggiore precisione: fra spira e spira è presente sempre lo stesso valore di tensione e quindi, anche se le prese sulle spire non sono posizionate esattamente, la tensione prelevata non è affetta da errori. Nel potenziometro resistivo la precisione della tensione prelevata dipende dalla posizione del cursore rispetto alle spire del conduttore e dalle variazioni di resistenza per unità di lunghezza. La tensione di uscita varia, come nel potenziometro resistivo, a gradini.

Un metodo per individuare la variazione del valore di induttanza causata da uno stimolo esterno consiste nell'inserire l'induttanza in un ponte di Wheatstone alimentato in corrente alternata, o di variare la frequenza in un oscillatore LC.

In conclusione, rispetto ai potenziometri resistivi questo tipo di trasduttore presenta lo svantaggio di essere più ingombrante e costoso, ma in compenso ha una durata maggiore e presenta una caratteristica di linearità meno sensibile al valore del carico.

Trasformatori differenziali

Trasduttori molto diffusi e impiegati sono i **trasformatori differenziali di tensione**. Sono formati da un avvolgimento primario connesso con una sorgente di tensione a corrente alternata (da 3 a 15 V con frequenza da 50 Hz a 20 kHz) e da due avvolgimenti secondari interconnessi in modo

tale che le tensioni indotte dal primario si bilanciano perfettamente, con la conseguenza che la corrente circolante è nulla.

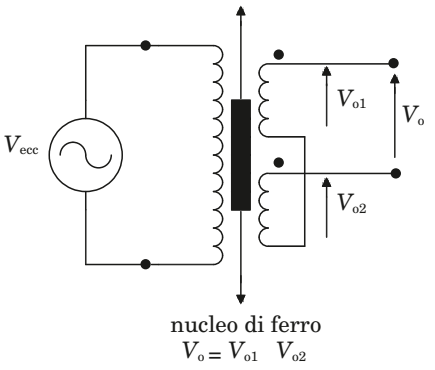
L'inserzione di un nucleo di ferro fra l'avvolgimento primario e quello dei secondari fa sì che i due avvolgimenti secondari non presentino più la stessa induttanza; si ha uno sbilanciamento delle tensioni indotte e la tensione di uscita risulta diversa da zero. Lo spostamento di fase del segnale di uscita rispetto alla tensione di alimentazione è determinato dalla direzione dello spostamento del nucleo (▸ ***Figg. 1.11a, b***).

Vengono realizzati trasduttori che rilevano sia spostamenti lineari **(LVDT)** del nucleo di ferro sia spostamenti angolari **(RVDT)**.

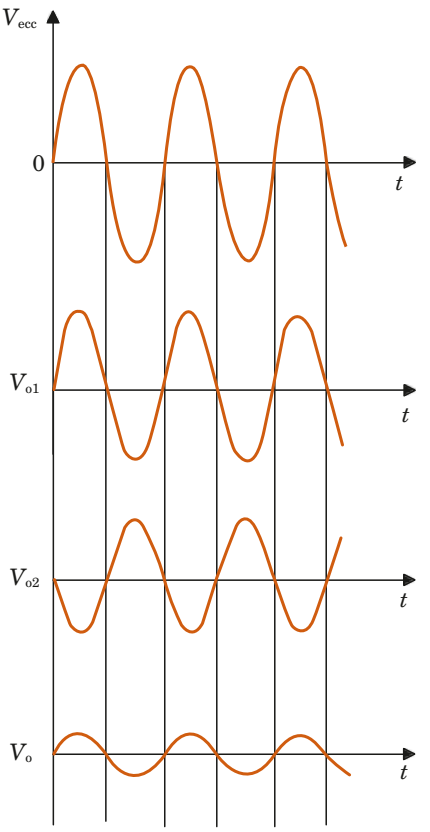
Il trasformatore differenziale è un dispositivo di grande precisione e sensibilità; viene utilizzato per effettuare misure micrometriche.

LVDT
– Linear variable differential transformer
RVDT
– Rotary variable differential transformer

Figg. 1.11a, b
Trasformatore differenziale variabile linearmente LVDT:
a. schema di principio;
b. forme d'onda di ingresso e di uscita.



1.11a



1.11b

Estensimetri

Gli estensimetri o **sensori di sforzo** (*strain gauges*) servono per misurare le deformazioni che si manifestano sulla superficie di un corpo per effetto di una qualsiasi causa fisica (forza, pressione, urti, vibrazioni). La misura della deformazione viene fatta convertendo la variazione dimensionale dell'oggetto in variazione di resistenza.

L'estensimetro è costituito da un conduttore metallico che viene applicato al corpo da misurare in modo tale che sia il corpo sia l'estensimetro subiscano le stesse deformazioni.

La resistenza elettrica di un conduttore dipende dalla sua resistività (che è una proprietà naturale del materiale); è direttamente proporzionale alla sua lunghezza e inversamente proporzionale alla sua sezione. Se la sezione è costante, la resistenza elettrica si ottiene applicando la seguente equazione:

$$R = \rho \frac{l}{S} \qquad \textbf{1.5}$$

dove:

R è la resistenza elettrica (ohm)
ρ è la resistività elettrica (ohm·mm^2/m)
l è la lunghezza del conduttore (m)
S è la sezione del conduttore (mm^2)

Negli estensimetri la resistenza elettrica varia al variare della forma geometrica (allungamenti e/o compressioni dovuti a sollecitazioni meccaniche) e/o della resistività.

Una forza (peso, coppia, pressione) applicata all'estensimetro ne provocano la deformazione. Se non viene superato il limite di elasticità del materiale di cui è costituito l'estensimetro, tali deformazioni sono proporzionali alla forza applicata.

La variazione relativa della lunghezza, per un corpo cilindrico a sezione circolare, è quindi correlata con la variazione relativa della resistenza.

$$\mathrm{GF} = \frac{\frac{\mathrm{d}R}{R}}{\frac{\mathrm{d}l}{l}} = 1 + 2\nu \qquad \textbf{1.6}$$

dove:

$\frac{\mathrm{d}R}{R}$ è la variazione relativa della resistenza dell'estensimetro
GF è il fattore di proporzionalità dell'estensimetro
$\frac{\mathrm{d}l}{l}$ è la variazione relativa di lunghezza dell'estensimetro in seguito alla sollecitazione
ν è il **COEFFICIENTE DI POISSON**

COEFFICIENTE DI POISSON
– Una delle quattro costanti elastiche di un materiale isotropo. È definito dal rapporto tra la contrazione laterale per unità di larghezza, *w*, e l'allungamento longitudinale per unità di lunghezza, *l*. Nei metalli è sempre < 1, per cui il GF è sempre < 3.

Il fattore di proporzionalità **GF** (può essere indicato anche con K_E) è caratteristico del materiale che costituisce l'estensimetro e varia da 2 a 3, per gli estensimetri a filo, constantana, nickel-cromo, è di circa 150 per quelli a semiconduttore.

Negli estensimetri piezoelettrici il GF è dato dalla seguente relazione:

$$\mathrm{GF} = E \cdot \pi_e + (1 + 2\nu) \qquad \textbf{1.7}$$

dove:

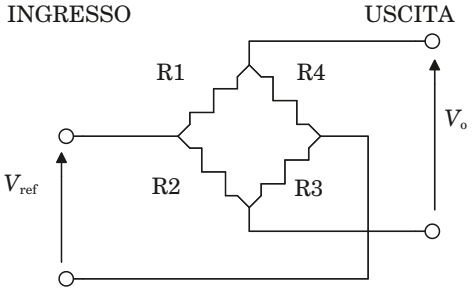
E è il modulo di elasticità di trazione o di Young, espresso in kg$_p$/mm^2
π_e è il coefficiente longitudinale della piezoelettricità
ν è il coefficiente di Poisson

GF
– Gauge factor

Gli alti GF degli estensimetri piezoelettrici sono dovuti al contributo della piezoelettricità. Essi permettono di ottenere, a parità di deformazione, una variazione di resistenza più ampia rispetto a quella fornita dal tipo metallico, ma sono più fragili, per cui possono misurare deformazioni di piccola entità; presentano anche l'inconveniente di essere molto sensibili alle variazioni di temperatura. Il valore resistivo iniziale è compreso fra 60 Ω e 2 kΩ; il valore di resistenza più utilizzato è quello di 120 Ω.

I trasduttori di questo tipo risentono fortemente delle variazioni di temperatura, per cui la variazione della resistenza dell'estensimetro viene misurata inserendoli in un circuito di misura a ponte di Wheatstone (▸ ***Fig. 1.12***). Il circuito di misura provvederà a valutare ed amplificare la tensione di squilibrio. I trasduttori che costituiscono gli elementi attivi del ponte di Wheatstone possono essere da uno a quattro.

Fig. 1.12
Collegamento a ponte di Wheatstone degli estensimetri.



$$V_o = V_{ref} \cdot \frac{R2 \cdot R4 - R1 \cdot R3}{(R1 + R4) \cdot (R3 + R4)}$$

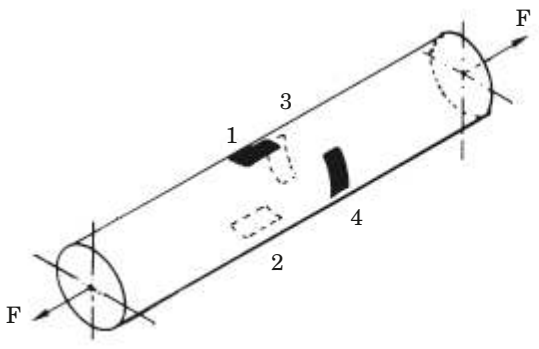
se R1 = R2 = R3 = R4 $\quad V_o = 0$ V

ESTENSIMETRI	RESISTENZE FISSE	TENSIONE DI USCITA
R1 = R1 + ΔR R3 = R3 + ΔR R2 = R2 − ΔR R4 = R4 − ΔR		$V_o = V_{ref} \cdot K_E \cdot \frac{\Delta 1}{1}$
R1 = R1 − ΔR R1 = R4 + ΔR	R2 R3	$V_o = V_{ref} \cdot K_E \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta 1}{1}$
R4 = R4 + ΔR	R1 R2 R3	$V_o = V_{ref} \cdot K_E \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta 1}{1}$

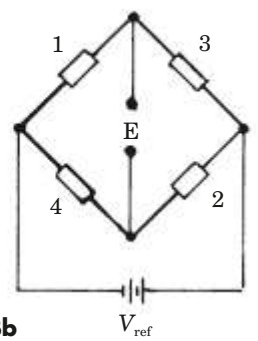
La necessità di porre più estensimetri sulla superficie del materiale oggetto di studio nasce dalla circostanza che quest'ultimo risente delle variazioni di temperatura indotte dal riscaldamento che si produce nel provino per effetto delle deformazioni cui è sottoposto. Introducendo nel ponte di misura un secondo estensimetro, in un punto del provino non sollecitato, è possibile operare una compensazione.

L'efficienza della misura può essere ulteriormente migliorata ponendo due estensimetri nel punto in cui avviene la deformazione: con uno si misurerà l'allungamento dovuto alla trazione, con l'altro si misurerà l'effetto dovuto alla compressione (▸ ***Figg. 1.13a, b***).

Figg. 1.13a, b
Metodo di collegamento degli estensimetri su un provino:
a. disposizione degli estensimetri;
b. ponte di Wheatstone.



1.13a



1.13b

La risoluzione di un estensimetro è limitata solo dal **rumore termico** (o **di Johnson**) in esso generato.

Esistono due tipi di estensimetro, quelli non vincolati e quelli vincolati. L'**estensimetro non vincolato** è costituito da un filo sottile teso tra due supporti vincolati all'apparecchiatura su cui si effettua la misura; lo stimolo applicato tende o comprime il filo, generando una variazione relativa della resistenza che può essere misurata. Questa tecnica di realizzazione dell'estensimetro fornisce risultati di buona precisione anche se il collegamento è relativamente fragile.

L'**estensimetro vincolato** viene realizzato stendendo il suo filo sottile (qualche decina di µm di diametro) fra due fogli sottili di plastica o di carta seguendo un percorso a zig-zag (▸ ***Fig. 1.14***). Lo stimolo esterno provoca una variazione delle dimensioni degli elementi e quindi dei parametri elettrici. Questo tipo di estensimetro ha maggiori durata e stabilità. Vengono realizzati anche estensimetri a semiconduttore (o **piezoresistivi**) mediante processi di diffusione o di impiantazione ionica. La variazione di resistenza è dovuta all'elevata caratteristica di piezoelettricità del materiale semiconduttore. Questo tipo di estensimetro presenta valori di coefficiente di temperatura maggiori di 100 e una bassa linearità, difetti peraltro superabili sfruttando le tecnologie a semiconduttore che consentono di realizzare il sensore, i circuiti di compensazione termica, il generatore della tensione di riferimento e l'amplificatore su un unico substrato. Un tipico campo di impiego di questo sensore è quello dei **trasduttori di pressione**.

Fig. 1.14
Forme costruttive di estensimetri a foglio (*fonte*: BLH).

Una particolare realizzazione, detta **cella di carico**, utilizza gli estensimetri per eseguire misure di forza, pesature e dosaggi elettronici. La misura della forza applicata al provino viene effettuata valutando la deformazione di un supporto elastico, applicato alla struttura in prova, sul quale sono stati montati uno o più estensimetri. Gli estensimetri vengono di norma incollati al provino sotto misura, per cui dopo l'installazione non sono più ricuperabili.

Trasduttori di posizione angolare

Il trasduttore di posizione angolare (*encoder*) è un apparato elettromeccanico che converte la posizione angolare del suo asse rotante in un segnale elettrico digitale. Collegato a opportuni circuiti elettronici con apposite connessioni meccaniche, l'encoder è in grado di misurare spostamenti angolari, movimenti rettilinei e circolari, nonché velocità di rotazione o accelerazioni.

Per il rilevamento del movimento angolare si possono usare tecniche diverse: capacitiva, induttiva, potenziometrica, magnetica e fotoelettrica.

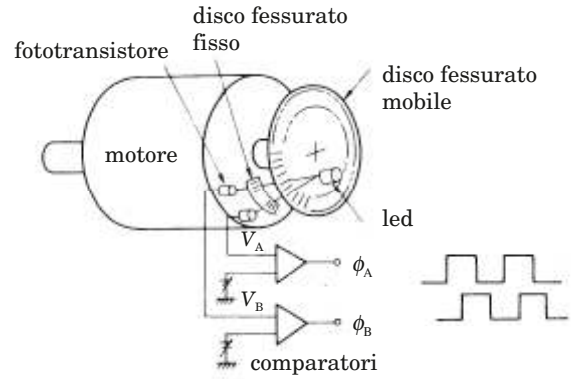
Gli encoder digitali si dividono in due categorie:

— ottici (▸ ***Fig. 1.15a***);
— magnetici (▸ ***Fig. 1.15b, c***).

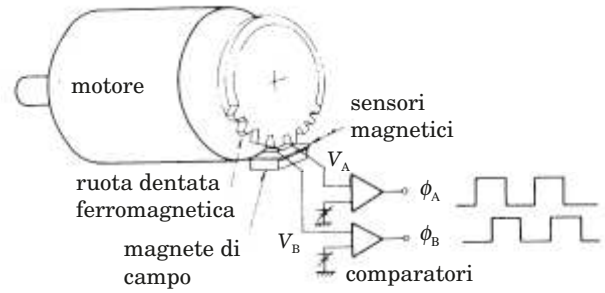
Il principio di funzionamento degli **encoder magnetici** è evidenziato dallo schema della figura 1.15b e in quello della figura 1.15c. Questi encoder sono di recente realizzazione, mentre gli **encoder ottici** (*optical encoder*) sono presenti sul mercato da più di un ventennio.

Il sistema a riluttanza magnetica (▸ Fig. 1.15b) è basato sulla misura dei cambiamenti di resistenza del circuito magnetico causati dal passaggio dei denti della ruota calettata sull'albero del motore. Questo sistema

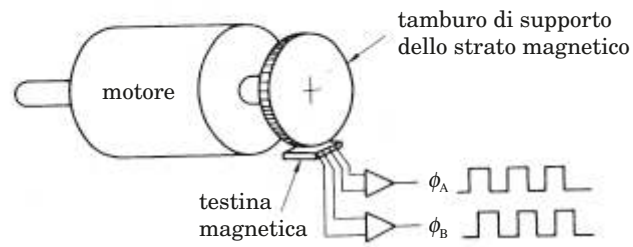
Figg. 1.15a, b, c
Tipi di trasduttori di posizione digitali angolari:
a. ottico;
b. a riluttanza magnetica;
c. a banda magnetica.



1.15a



1.15b



1.15c

fornisce una bassa risoluzione angolare (circa 200 impulsi per giro).

Il sistema a banda magnetica (▸ Fig. 1.15c) utilizza un sensore magnetico che rileva il campo proveniente da un tamburo ricoperto superficialmente con un materiale per registrazioni magnetiche (▸ ***Vol. 1***, ***Mod. A***, ***Cap. 2***) sul quale sono stati incisi i segnali di posizione. Con questa tecnica è possibile ottenere una risoluzione tripla rispetto a quella fornita dai tradizionali encoder ottici.

Rispetto a quelli ottici, i trasduttori magnetici danno una migliore risposta in frequenza e offrono più affidabilità per la minore usura degli elementi utilizzati.

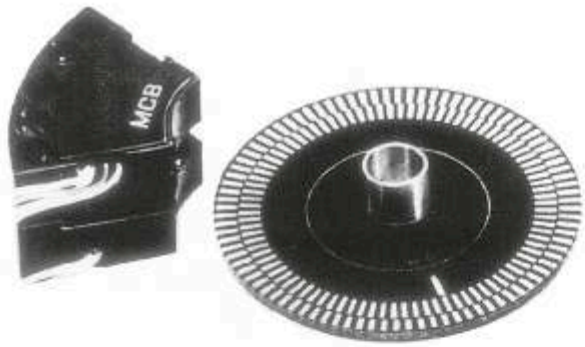
I trasduttori di posizione angolare digitali più utilizzati sfruttano la tecnica fotoelettrica e possono essere **di tipo incrementale** o **di tipo assoluto**.

Un codificatore ottico converte la rotazione angolare di un organo meccanico in un segnale logico con livelli compatibili con la famiglie logiche TTL o CMOS.

Trasduttore di posizione angolare incrementale

Il trasduttore di posizione angolare incrementale è costituito da un disco trasparente (▸ ***Fig. 1.16***) sul cui bordo sono stati ricavati dei settori opachi ugualmente distanziati, e da un rilevatore ottico (per esempio una forcella

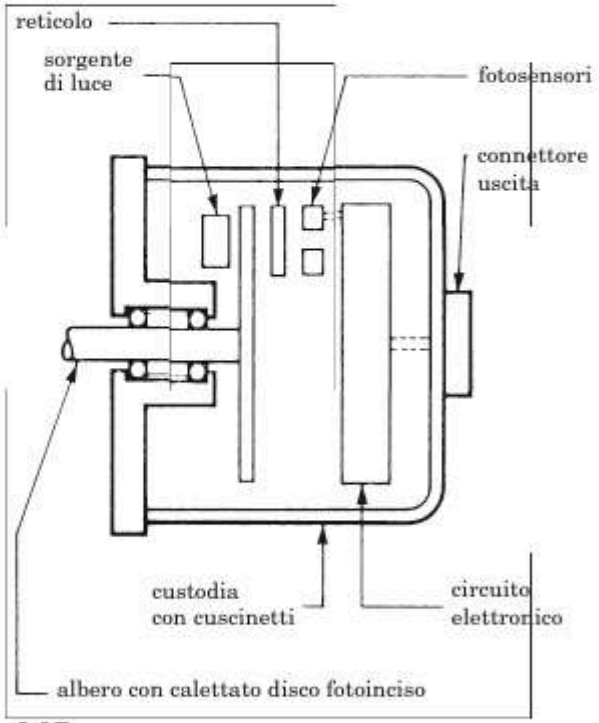
Fig. 1.16
Aspetto costruttivo del disco di decodifica di un encoder incrementale e forcella ottica (*fonte*: Hewlett-Packard).



ottica) che rileva il diverso comportamento ottico della superficie del disco. Quando il disco viene messo in rotazione si genera una serie di impulsi ottici che vengono rilevati e convertiti da un circuito elettronico montato nello stesso contenitore della struttura meccanica (▸ ***Figg. 1.17*** e ***1.18***).

La **risoluzione** dell'encoder dipende dal numero di settori presenti sul disco (▸ Fig. 1.16) e dal sistema ottico di lettura. La **risoluzione angolare** è data dal rapporto fra l'angolo giro (360°) e il numero di settori presenti sul disco codificato (è misurata come frazione d'arco).

Fig. 1.17
Schema di un encoder incrementale.



1.17

1.18

Fig. 1.18
Assonometria di un encoder ottico incrementale (*fonte*: ELCIS).

Mentre per valori di risoluzione bassi sono sufficienti sistemi ottici rudimentali, costituiti da semplici diaframmi schermanti, per ottenere alti valori di risoluzione si utilizzano sistemi ottici sofisticati come quello della ***figura 1.19***, dove una serie di lenti provvede a focalizzare il fascio di luce emesso dalla sorgente luminosa in corrispondenza del disco codificato. Un'altra serie di lenti provvede poi a irradiare l'elemento fotosensibile del ricevitore.

Lo **spostamento angolare** può essere ricavato moltiplicando il

numero di impulsi (contati da una certa posizione di riferimento) per la distanza fra due settori o passo (misurata come frazione d'arco). Gli encoder incrementali possono essere usati anche per misure di velocità contando il numero di impulsi generati dall'encoder in un certo intervallo di tempo di riferimento (un secondo, un minuto).

Trasduttore di posizione angolare di tipo assoluto

Il trasduttore di posizione angolare di tipo assoluto è costituito da un disco di materiale trasparente e da un gruppo di rivelatori ottici. Il disco viene suddiviso in vari settori identici (▸ ***Fig. 1.20***), ciascuno dei quali viene a sua volta suddiviso in tracce di uguale spessore che possono essere trasparenti (0) oppure opache (1).

Le tracce di un settore, lette contemporaneamente, forniscono un valore binario. Codificando opportunamente ogni settore è possibile determinare, per ogni frazione d'arco, un codice binario che identifica completamente il settore. La risoluzione R è data dall'ampiezza del settore, cioè dal numero di suddivisioni operate nell'angolo giro del disco, ed è pari a :

$$R = \frac{360°}{2^n - 1} \qquad 1.8$$

dove:
n è il numero di cifre binarie impiegato

I codici utilizzati (▸ ***Tab. 1.1***) sono il binario, il BCD (fino a sei decadi) e il codice Gray (fino a 24 bit).

Se non si adottano particolari precauzioni, quando il disco viene codificato utilizzando il codice binario puro o quello BCD possono crearsi serie difficoltà causate da ambiguità di lettura connesse alla transizione da un determinato numero a quello adiacente. Osservando la tabella 1.1 (codici binari) possiamo notare che per passare, per esempio, dal numero 3 (0011) al numero 4 (0100) si devono invertire tre cifre binarie. Se gli elementi di

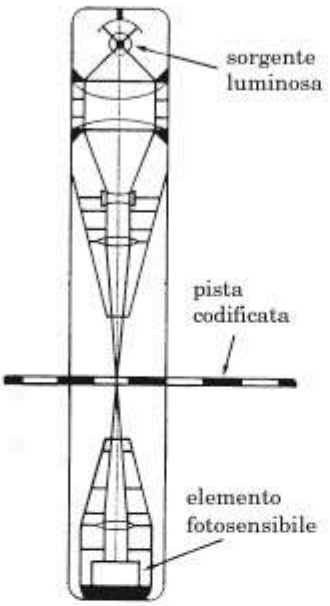
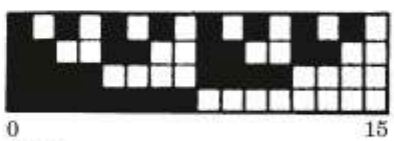
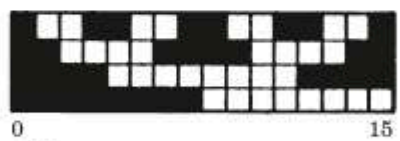


Fig. 1.19
Sistema ottico ad alta risoluzione per un trasduttore di posizione ottico.

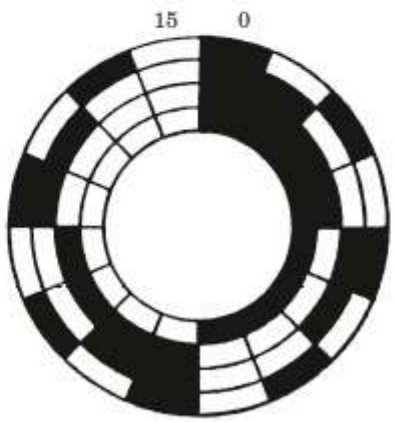
Figg. 1.20a-d
Aspetto costruttivo del disco di decodifica di un encoder assoluto:
a. binario puro lineare;
b. binario puro angolare;
c. codice Gray lineare;
d. codice Gray angolare.



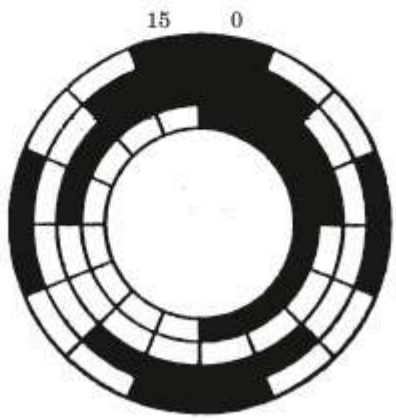
1.20a



1.20c



1.20b



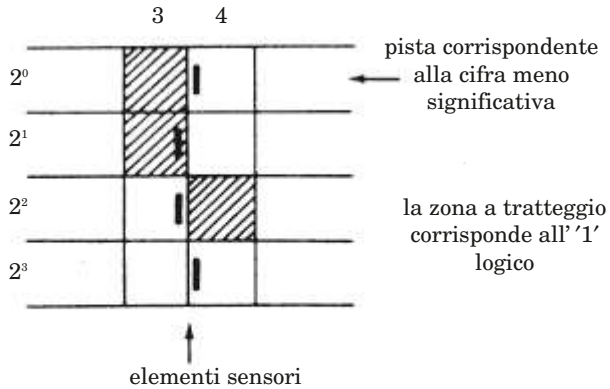
1.20d

rivelazione non sono perfettamente allineati (▸ ***Fig. 1.21a***), nel periodo di transizione potrebbe comparire il numero 2, un codice errato che, se recepito ed elaborato dal sistema di controllo, può generare gravi errori di posizionamento. Invece quando la transizione avviene fra due numeri che comportano la modifica di un solo bit (▸ ***Fig. 1.21b***), non si verificano mai errori di lettura.

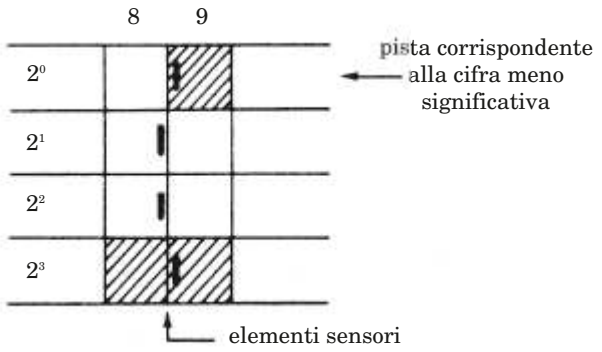
Tabella 1.1 Codici binario, BCD e Gray

N. DECIMALE	BINARIO PURO	CODICE BCD	CODICE GRAY
0	00000	0000	00000
1	00001	0001	00001
2	00010	0010	00011
3	00011	0011	00010
4	00100	0100	00110
5	00101	0101	00111
6	00110	0110	00101
7	00111	0111	00100
8	01000	1000	01100
9	01001	1001	01101
10	01010		01111
11	01011		01110
12	01100		01010
13	01101		01011
14	01110		01001
15	01111		01000
16	10000		11000
17	10001		10001
18	10010		10011
19	10011		11010
20	10100		11110

Figg. 1.21a, b
Encoder ottico assoluto con quattro rivelatori di lettura disallineati:
a. transizione di più bit;
b. transizione di un solo bit.



1.21a



1.21b

Il disco che utilizza il codice Gray ha la caratteristica di essere *progressivo*, in quanto questo codice prevede che fra un numero e il successivo ci sia sempre il salto di un solo bit. Un altro vantaggio del codice Gray è dato dal fatto che la pista relativa alla traccia di peso minore ha un numero di interruzioni pari alla metà di quelle corrispondenti di un numero binario. Quando si utilizza questo codice il sistema di lettura utilizza circuiti integrati (TTL 7444) o algoritmi software per convertire il valore letto nel corrispondente valore binario puro o BCD.

La sorgente di luce nei dispositivi più moderni è un led all'arseniuro di gallio che garantisce una vita di 100 000 ore, molto maggiore di quella degli encoder che utilizzano lampade. Questi ultimi sono sensibili alle vibrazioni meccaniche, all'annerimento del bulbo e all'assottigliamento del filamento, e hanno una vita compresa fra le 5000 e le 40 000 ore.

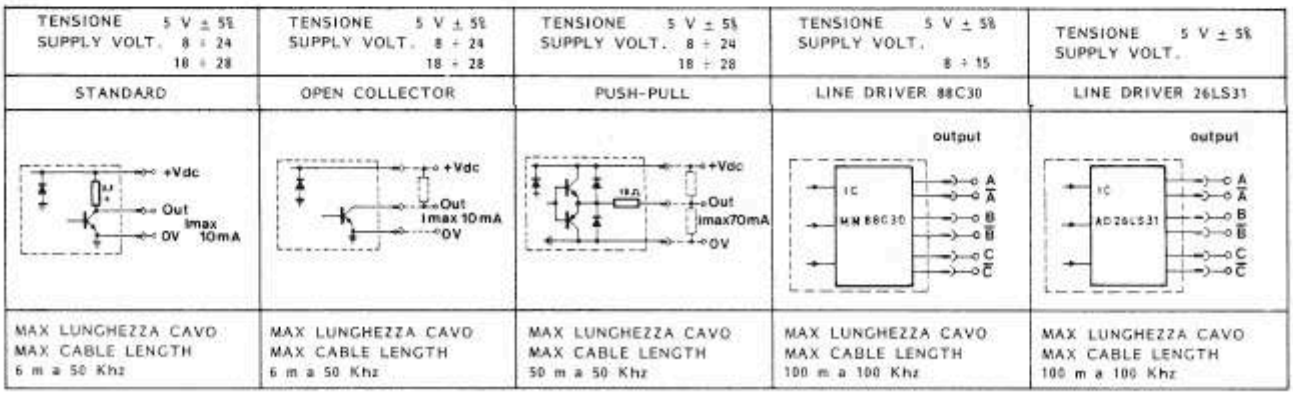
L'elemento ricevente è quasi sempre un **fototransistor**: un transistor nel quale la modulazione della corrente di base viene fornita dall'energia radiante dell'onda luminosa incidente. Il fototransistor viene posto in conduzione (o interdetto) dal fascio di luce emesso dalla sorgente, ogniqualvolta durante la rotazione fra sorgente e ricevitore s'interpone un settore trasparente (o opaco) del disco rotante. Per ottenere segnali di uscita stabili in larghezza e in ampiezza, anche in presenza di variazioni della tensione di alimentazione e della temperatura ambiente, si utilizzano talvolta due fototransistor collegati in configurazione push-pull, posizionati uno nella zona oscura e uno nella zona illuminata.

Caratteristiche elettriche

Un generico **encoder di tipo incrementale** viene identificato dalle seguenti specifiche tecniche:

- numero di impulsi per giro;
- tensione di alimentazione o suo campo di variazione;
- corrente assorbita dall'apparecchiatura (consumo);
- tipo di versione (monodirezionale, bidirezionale, con o senza indicazione di zero);
- campo di variazione della temperatura di funzionamento e di immagazzinamento del dispositivo;
- tipo di circuito elettronico (▸ ***Fig. 1.22***) realizzato nello stadio di uscita (standard, a collettore aperto, push-pull, particolari *line driver*);
- tipo di connessione, a cavo o a connettore; nel secondo caso viene fornita la sigla della norma che ne permette l'identificazione univoca.

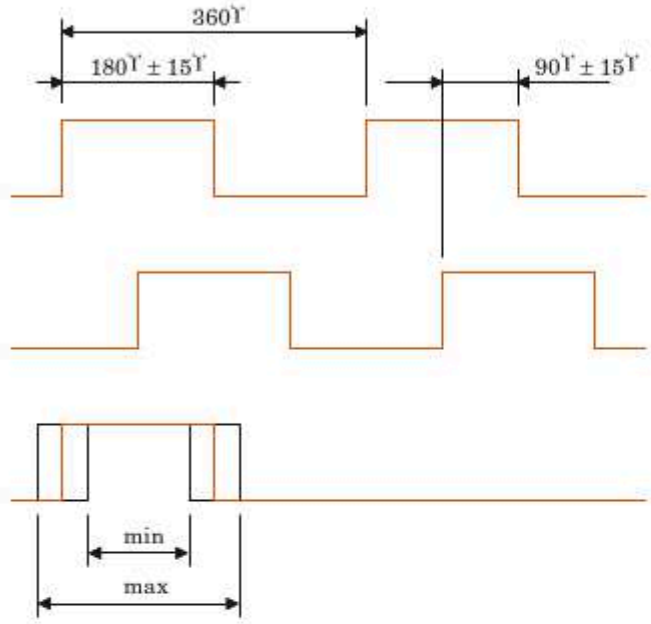
Fig. 1.22
Tipologia degli stadi di uscita di un encoder ottico.



Per gli **encoder di tipo assoluto**, oltre alle specifiche già descritte per il tipo incrementale, viene fornita anche la tabella del codice generato in uscita e la sua risoluzione.

La versione monodirezionale degli encoder possiede un solo segnale di uscita. La versione bidirezionale fornisce due segnali (denominati in genere fase A e fase B) che permettono di determinare il senso di rotazione attraverso la misura del loro sfasamento relativo. Se il dispositivo possiede anche il segnale di zero, si ha la generazione di un impulso per ogni giro completo del disco (fase C, ▸ ***Figg. 1.23a, b, c***).

Figg. 1.23a, b, c
Segnali di fase di un encoder incrementale.
a. fase *A*;
b. fase *B*;
c. fase *C*.



1.23a

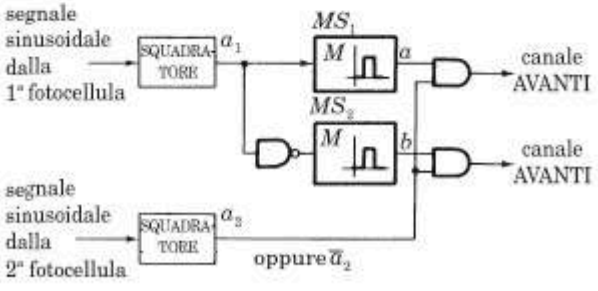
1.23b

1.23c

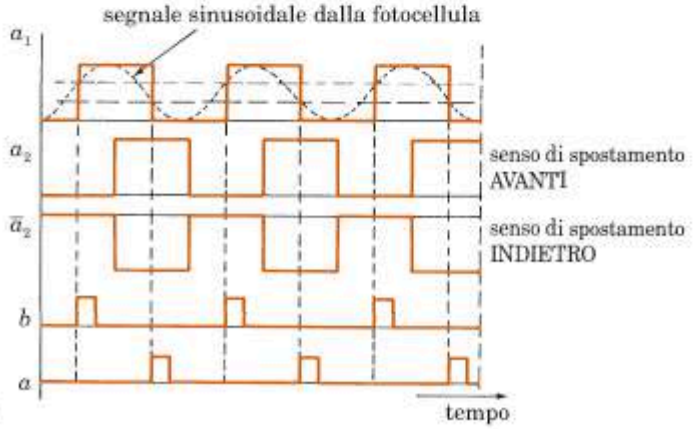
Figg. 1.24a, b
Discriminatore del senso di rotazione:
a. schema a blocchi del circuito elettronico cablato all'interno del contenitore dell'encoder ottico;
b. diagramma temporale dei segnali scambiati.

Le ***figure 1.24a, b*** mostrano lo schema a blocchi del circuito elettronico incluso nel contenitore dell'encoder che genera i segnali di fase e il diagramma temporale dei segnali scambiati.

La ***figura 1.25a*** mostra lo schema a blocchi di un circuito elettronico capace di discriminare il senso di rotazione dell'encoder e di contare gli impulsi generati. La documentazione dello schema è completata dal diagramma temporale dei segnali scambiati (▸ ***Fig. 1.25b***).

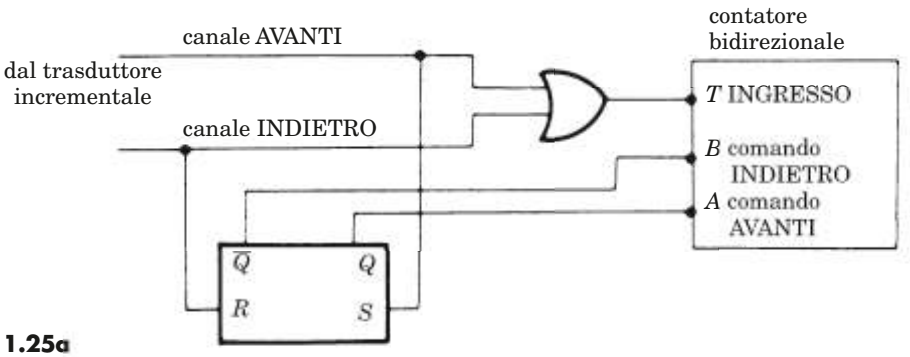


1.24a

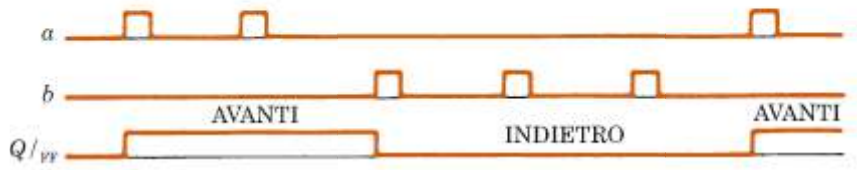


1.24b

Figg. 1.25a, b:
a. schema a blocchi del circuito elettronico che discrimina il senso di rotazione dell'encoder e conta gli impulsi generati;
b. diagramma temporale dei segnali scambiati.



1.25a



1.25b

Fig. 1.26
Encoder ottico.

Nella realizzazione a cavo (▸ ***Fig. 1.26***), l'identificazione dei fili di connessione viene fatta mediante una tabella che associa il colore della guaina isolante del cavo alla funzione; ovviamente tutti i cavi sono di colore diverso, per esempio fase *A*: bianco; fase *B*: giallo; positivo della tensione di alimentazione: rosso; massa: nero.

Nella realizzazione a connettore ogni segnale è completamente identificato dalla numerazione standard del connettore stesso, per esempio: pin 1, fase *A*; pin 2, fase *B* ecc.

Caratteristiche meccaniche

Le caratteristiche meccaniche di un encoder sono:
— il peso;
— il massimo numero di giri;
— la coppia di avviamento misurata a 25 °C;
— il momento di inerzia del rotore;
— la resistenza all'urto e alla vibrazione;
— il carico radiale e assiale sull'albero;
— il diametro del giunto, se standardizzato;
— il grado di protezione offerto dalla custodia;
— la vita dei cuscinetti.

L'accoppiamento meccanico fra trasduttore e organo ruotante (mandrino, motore) dev'essere realizzato con un giunto elastico per evitare che l'albero del trasduttore operi sotto forzo. L'eventuale gioco meccanico viene in genere recuperato tramite un circuito elettronico.

Applicazioni

Gli encoder ottici vengono utilizzati nei seguenti campi applicativi: controllo dei processi industriali, robot industriali, macchine utensili, strumenti di misura, plotter, laminatoi e macchine per il taglio delle lamiere, bilance e bilici, antenne, telescopi, impianti ecologici, macchine da stampa e da imballaggio, macchine tessili e conciarie, gru, carri ponte, presse, macchine per la lavorazione del legno, della carta, del marmo, del cemento, del vetro ecc.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Come si misura uno spostamento relativo?
2. Quali vantaggi offrono i trasduttori resistivi?
3. Quali sono le relazioni fra le grandezze che interessano i trasduttori capacitivi?
4. Che cos'è il fattore di gauge?
5. A che cosa serve un trasduttore di posizione angolare?
6. Che differenza c'è fra un encoder assoluto e uno relativo?
7. Quale vantaggio offre la codifica a codice Gray del disco di un encoder assoluto?
8. Quali parametri definiscono le caratteristiche di un encoder incrementale?
9. Come si individua il senso di rotazione con un encoder incrementale?

3 TRASDUTTORI DI VELOCITÀ E DI ACCELERAZIONE

Un trasduttore di velocità e di accelerazione, o **accelerometro**, può essere facilmente ottenuto da un trasduttore di posizione ricordando che la velocità è la derivata nel tempo della posizione, e che l'accelerazione è la derivata prima nel tempo della velocità, o la derivata seconda nel tempo della posizione.

La costruzione di un trasduttore di posizione è in genere più semplice di quella di un trasduttore di velocità, per cui quest'ultimo viene in genere realizzato utilizzando un trasduttore di posizione per la conversione della grandezza fisica e un circuito elettronico che successivamente elabora, analiticamente, il segnale elettrico ottenuto. L'operazione di derivazione sul segnale ottenuto dal trasduttore di posizione è eseguita con derivatori elettronici. Un'ulteriore derivazione del segnale di uscita fornisce il valore di accelerazione relativa.

Nel ***paragrafo 1.2*** abbiamo anche accennato alla possibilità di utilizzare un encoder digitale per effettuare misure di velocità. Infatti, per determinare la velocità di rotazione del rotore è sufficiente contare gli impulsi generati dall'encoder in un intervallo di tempo prefissato (un secondo, un minuto o una frazione di secondo). Rispetto a una dinamo tachimetrica, un encoder genera un segnale già adatto all'elaborazione digitale; inoltre, non richiede operazioni di taratura perché la relazione frequenza-velocità dipende dal numero di settori presente sul disco codificato, e quindi è stabilita in fase di fabbricazione. Le sue caratteristiche di trasduzione sono stabili nel tempo, mentre quelle di una dinamo tachimetrica sono variabili (a causa di fenomeni di demagnetizzazione del rotore e di usura delle spazzole). È anche possibile adottare tecniche costruttive tali da ridurre al minimo gli attriti e il momento di inerzia, così da non caricare il sistema collegato.

Un accelerometro è un trasduttore utilizzato per misurare accelerazioni. È costituito da una massa montata su una o più molle vincolate in modo da potersi muovere in una sola direzione (▸ ***Fig. 1.27***). Quando la massa subisce accelerazioni nella direzione consentita dal vincolo, il suo spostamento è proporzionale all'accelerazione. Questa informazione può essere utilizzata per effettuare misure di forza e di pressione.

La ***figura 1.28*** mostra un accelerometro capacitivo in cui lo spostamento della massa inerziale genera la variazione della capacità.

Fig. 1.27
Trasduttore di forza.

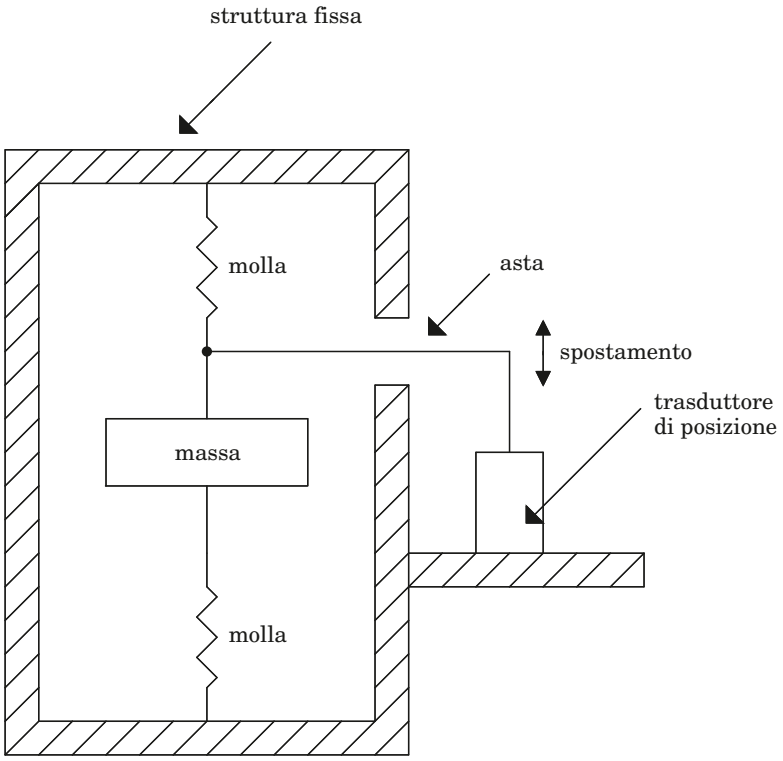
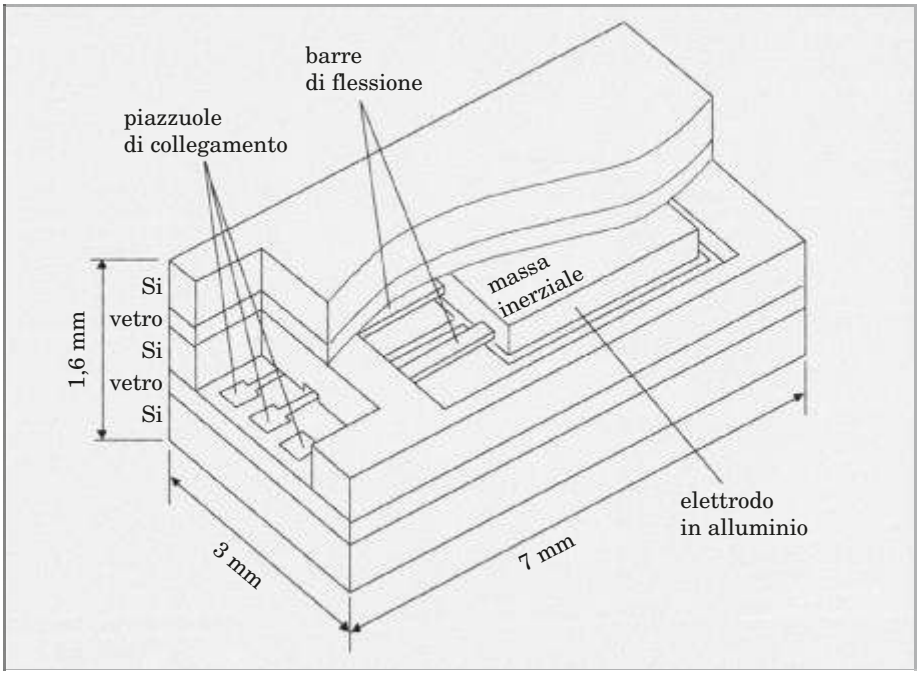


Fig. 1.28
Struttura di un accelerometro capacitivo (fonte: Star Elettronica).



La ***figura 1.29*** mostra un accelerometro realizzato con la tecnologia monolitica dei circuiti integrati: il dispositivo contiene i circuiti dell'accelerometro, nonché quelli di condizionamento e di elaborazione del segnale da essi fornito.

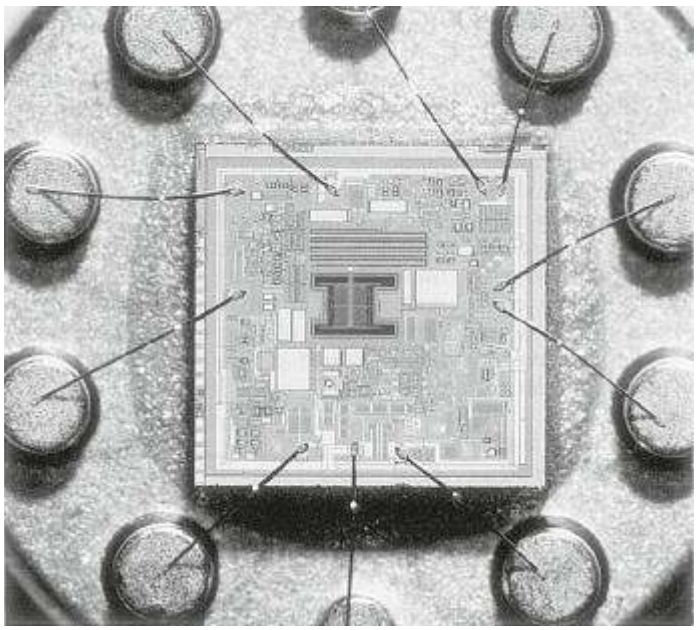


Fig. 1.29
Accelerometro ADXL50 (*fonte*: Analog Devices).

Dinamo tachimetrica

La dinamo tachimetrica è una macchina elettrica rotante che viene montata coassialmente all'albero del motore di cui si desidera rilevare la velocità di rotazione. La parte fissa genera un campo magnetico uniforme in cui si muove la parte mobile (indotto). La tensione in uscita, che può essere positiva o negativa in funzione del senso di rotazione, è proporzionale alla velocità di rotazione angolare dell'indotto (▸ ***Fig. 1.30***).

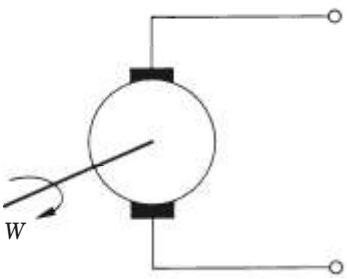
Il valore di uscita tipico di una dinamo tachimetrica commerciale è di 90 V a 1000 giri/min.

Le dinamo tachimetriche a magnete permanente presentano, sovrapposta alla tensione di uscita, un'ondulazione di alta frequenza (*ripple*) dovuta al commutatore. Questo disturbo può essere eliminato con un filtro passa basso (un condensatore di livellamento).

La dinamo tachimetrica deve possedere un basso momento di inerzia e un'elevata linearità; il circuito di eccitazione è costituito da un magnete permanente. I parametri elettrici e meccanici che la caratterizzano sono:

— la costante tachimetrica K_D (volt/giro/min);
— la massima velocità angolare (giri/min);
— la corrente massima di carico (A);
— la linearità espressa in percentuale;
— il momento di inerzia del rotore ($g \cdot cm^2$);
— il peso (kg).

La dinamo tachimetrica presenta alcuni problemi tecnici legati alla presenza di un'ondulazione residua, alla presenza del commutatore e quindi ai contatti striscianti che tendono a usurarsi, alla ridotta velocità di rotazione, alla tensione influenzata dalla corrente erogata. Per questa ragione i moderni azionamenti tendono a sostituirla con encoder incrementali digitali e magnetici.



$V \simeq E = K_D W$

Fig. 1.30
Dinamo tachimetrica.

I sistemi elettromeccanici MEMS

I sistemi elettromeccanici MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) sono micromacchine integrate sul silicio con tecniche compatibili con le tecnologie VLSI. Si possono utilizzare sia come **sensori** sia come **attuatori**.

I circuiti di acquisizione che misurano il fenomeno di amplificazione e di condizionamento, di elaborazione e di controllo e, in qualche caso, di trasmissione dell'informazione sono integrati sullo stesso circuito integrato (chip).

I MEMS, in qualità di sensori, possono essere utilizzati per rilevare fenomeni di varia natura: meccanica (accelerazioni, angoli, pressioni, suoni ecc.), termica (temperatura, flusso di calore ecc.), chimica (pH ecc), ottica (intensità della radiazione luminosa ecc.), magnetica (intensità del flusso magnetico ecc.). Come sensori, i MEMS vengono impiegati nelle applicazioni automobilistiche e mediche, negli antifurti, nei sistemi di guida e di ricerca automatica, nelle applicazioni di realtà virtuale, nella robotica, nella stabilizzazione di masse in movimento (giroscopi), nella rilevazione di velocità e di spostamenti in scala millimetrica.

I MEMS, in qualità di attuatori, sono utilizzati nei videoproiettori che utilizzano la tecnologia DLP (Digital Light Processing) per comandare microspecchi integrati per formare l'immagine oggetto della proiezione (▸ ***Fig. 1.31***), nelle testine delle stampanti ink-jet.

Fig. 1.31
Microspecchio realizzato in tecnologia MEMS.

Una delle applicazioni più conosciute dei dispositivi MEMS è quella degli accelerometri. Gli accelerometri vengono utilizzati nel settore automobilistico per la sicurezza attiva (ABS-Antilock Braking System) e passiva (centraline airbag) e come aiuto nelle partenze in salita; nei game controller (per esempio, Wii di Nintendo); negli hard disk (consentendo il distacco rapido delle testine di lettura e scrittura in caso di urti e cadute); per rilevare l'inclinazione di un oggetto (per esempio, in un cellulare per adeguare il display e le scelte dell'utente all'inclinazione stessa).

Il trasduttore è realizzato in forma integrata e si compone di una micromassa sospesa, libera di muoversi lungo un asse. Questa micromassa costituisce un'armatura di capacità variabile in grado di spostarsi in base alle accelerazioni. La variazione di capacità è proporzionale all'accelerazione ed è dell'ordine di qualche picoFarad (fino a 100 pf per forti accelerazioni) rispetto a un valore fisso che, ad accelerazione nulla, è di qualche picoFarad.

La variazione capacitiva viene rilevata da un circuito amplificatore di carica a basso rumore che genera il segnale di uscita.

Nella ***figura 1.32*** viene mostrato lo schema a blocchi del trasduttore accelerometrico a tre assi (*x-y-z*) LIS3L02AS4 prodotto dalla ST Microelectronics.

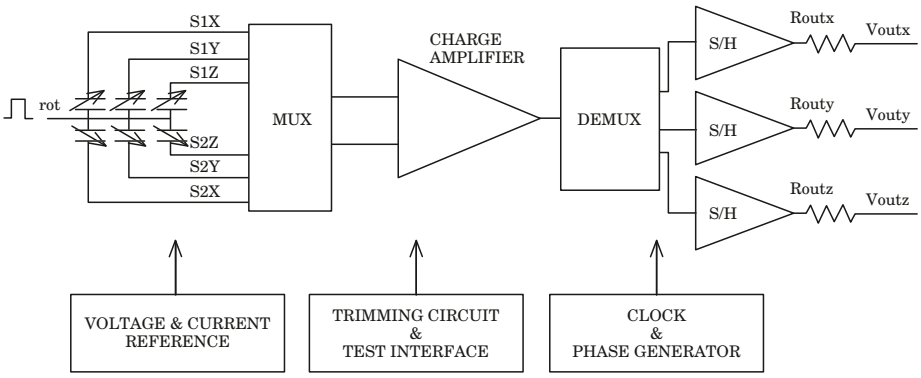


Fig. 1.32
Schema a blocchi del trasduttore accelerometrico a tre assi LIS3L02AS4 (fonte: ST Microelectronics).

4 SENSORI DI PROSSIMITÀ

Fig. 1.33
Forme costruttive dei trasduttori di prossimità.

I sensori di prossimità sono trasduttori che rilevano la presenza di un oggetto in movimento rispetto al sensore. Il sensore più classico è un commutatore elettromeccanico, detto **finecorsa**, manovrato dal corpo dell'oggetto da rilevare che, muovendosi, agisce sull'organo mobile modificandone la posizione e provocando la chiusura o l'apertura dei contatti. L'asta di comando viene realizzata in varie forme che si adattano alle diverse situazioni operative (▸ ***Vol. 1***, ***Mod. C***, ***Cap. 7***, scaricabile dal sito Internet).

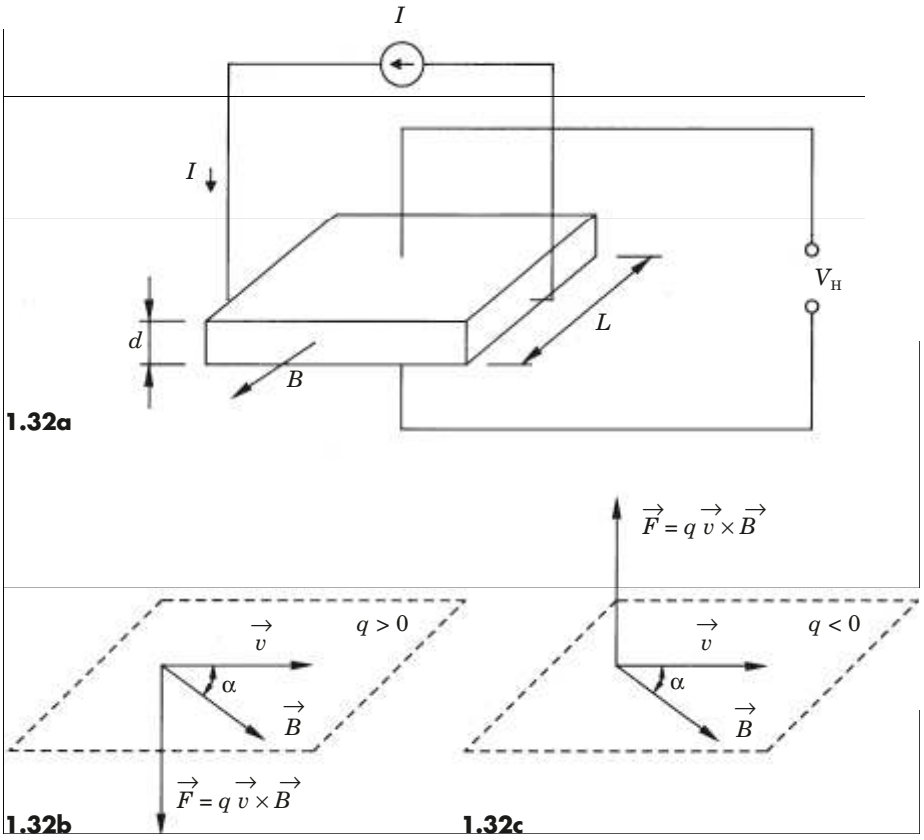
Questo tipo di sensore è però poco affidabile, risente fortemente delle condizioni meccaniche, presenta problemi di installazione negli ambienti a rischio esplosivo (polverosi o saturi di gas) ed è sensibile alle condizioni ambientali (temperatura, umidità). Nelle applicazioni industriali si tende quindi a sostituirlo con trasduttori di tipo ottico o magnetico, che non richiedono alcun contatto fra il sensore e la superficie del corpo in movimento. La ***figura 1.33*** mostra alcune forme costruttive dei trasduttori di prossimità.

Sensori di Hall

In una barretta di semiconduttore (drogato di tipo P o N) o di metallo, percorsa da una corrente elettrica I immersa in un campo magnetico di induzione B diretto trasversalmente alla corrente, i portatori di carica subiscono l'effetto di una forza (detta **FORZA DI LORENZ**) che tende a spostarli perpendicolarmente sia alla direzione della corrente sia a quella del campo magnetico (▸ ***Fig. 1.34a, b, c***). Tale forza fa sì che i portatori si addensino su un lato della barretta; questo processo di accumulo delle cariche si manifesta come una differenza di potenziale V_{HF}, detta **tensione di Hall**, fra la faccia superiore e inferiore della barretta.

FORZA DI LORENZ
– Forza esercitata da un campo magnetico su una carica elettrica q che si muove a velocità v

La tensione di Hall è direttamente proporzionale al prodotto della corrente I per il campo magnetico B, ed è inversamente proporzionale



Figg. 1.34a, b, c
Effetto Hall:
a. modello schematico per la descrizione dell'effetto Hall;
b. effetto della forza di Lorenz su una carica elettrica q positiva ($q > 0$) che si muove in un campo magnetico;
c. effetto della forza di Lorenz su una carica elettrica q negativa ($q < 0$) che si muove in un campo magnetico.

$\times$ prodotto vettoriale
v velocità della carica
B induzione magnetica
q carica elettrica
F forza di Lorenz

alla concentrazione degli elettroni liberi n, alla carica dell'elettrone e ($e = 1{,}6 \times 10^{-19}\ C$) e allo spessore d della barretta.

$$V_{HF} = \frac{B \cdot I}{n \cdot e \cdot d} = K_{BO} \cdot B \cdot I \qquad \textbf{1.9}$$

dove:

K_{BO} è un coefficiente (detto **sensibilità del trasduttore**) dato dal rapporto fra la **costante di Hall** (R_H):

$$R_H = \frac{1}{n \cdot e} \qquad \textbf{1.10}$$

e lo spessore d della barretta del materiale.

Se si alimenta il sensore a corrente costante e si conoscono il valore della densità di carica dei portatori mobili e le dimensioni del sensore, misurando la tensione di Hall si può determinare il valore dell'intensità del campo magnetico. I sensori di Hall a semiconduttore presentano una maggiore sensibilità rispetto a quelli metallici in quanto, come abbiamo visto (▸ Fig. 1.9), l'effetto Hall aumenta al diminuire della concentrazione di portatori mobili, che è più bassa nei semiconduttori che nei metalli.

I materiali semiconduttori utilizzati per costruire i sensori di Hall sono l'arseniuro di indio oppure di gallio. Quest'ultimo materiale si è rivelato molto efficace perché, utilizzando transistor MESFET (▸ ***Vol. 2***, ***Mod. B***,

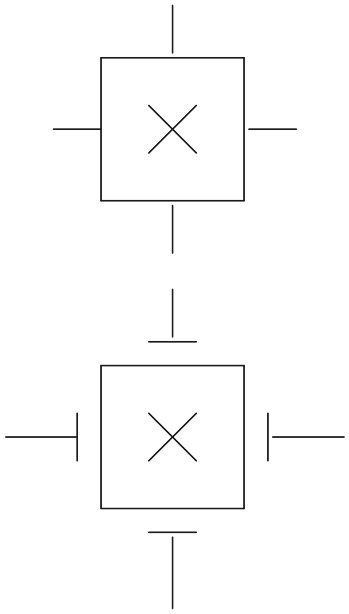


Fig. 1.35
Simboli grafici del trasduttore a effetto Hall.

Cap. 4) è possibile costruire sensori a circuito integrato molto compatti e affidabili, ricavati completamente sullo stesso substrato.

La ***figura 1.35*** mostra due simboli grafici utilizzati per rappresentare un sensore di Hall.

I sensori di Hall sono realizzati in modo integrato e comprendono, oltre al sensore a effetto Hall vero e proprio, il generatore di corrente che lo alimenta e il circuito di condizionamento del segnale generato (▸ ***Figg. 1.36a, b***). In alcuni circuiti integrati il generatore di corrente viene realizzato utilizzando un generatore di tensione regolabile dall'esterno. Lo stadio di condizionamento è in grado di generare in uscita segnali compatibili con le principali famiglie logiche TTL e CMOS. Il segnale di uscita (tensione o corrente) può essere proporzionale all'intensità del campo magnetico (**comportamento lineare**) oppure del tipo on-off, con un'isteresi più o meno grande.

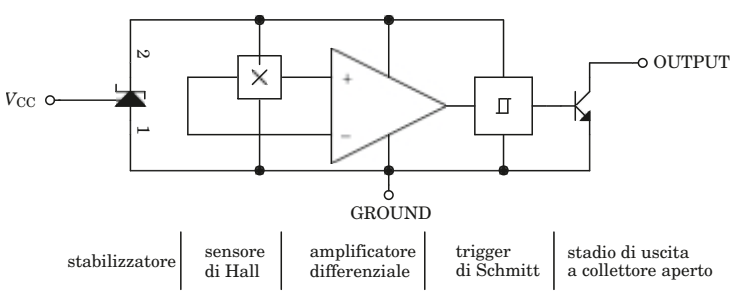
I **sensori di tipo lineare** sono impiegati per misurare l'intensità dei campi magnetici e come trasduttori di posizione, traducendo uno spostamento relativo in una variazione del campo magnetico. I **sensori di tipo on-off** sono impiegati per realizzare sensori di prossimità destinati a sostituire nelle macchine operatrici (macchine utensili a CN-Controllo numerico, robot, transfer) i commutatori (finecorsa) elettromeccanici (▸ ***Vol. 1***, ***Mod. C***, ***Cap. 7***, scaricabile dal sito Internet).

Il sensore di prossimità può essere realizzato in due modi:

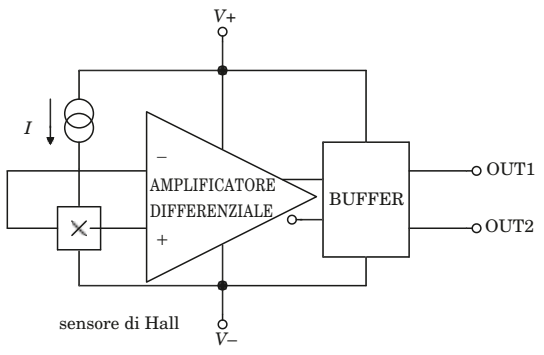
1. la tensione di Hall viene variata dall'influenza di un campo magnetico generato da un magnete permanente solidale con l'oggetto;
2. un circuito magnetico crea un flusso che concatena il sensore di Hall in modo tale che il campo magnetico può essere modificato dal passaggio dell'oggetto in movimento (naturalmente la variazione del flusso provoca anche una variazione della tensione di Hall).

I sensori di Hall, il cui campo applicativo è molto vasto e coincide con quello descritto per le magnetoresistenze (▸ ***Vol. 1***, ***Mod. B***, ***Cap. 4***), vengono impiegati nella realizzazione dei trasduttori di posizione, di velocità, di pressione (nei quali si rileva la posizione di diaframmi magnetici), di intensità del campo magnetico dei magneti permanenti, degli elettromagneti, dei solenoidi o dei motori in corrente continua per effettuare la commutazione senza contatti, dei motori brushless (▸ ***Mod. D***, ***Cap. 7***). Di solito la cella di Hall è montata in modo solidale

Figg. 1.36a, b
Schema funzionale interno di due sensori con generatore di Hall:
a. UGN3020T (Sprague);
b. KSY10 (Siemens).



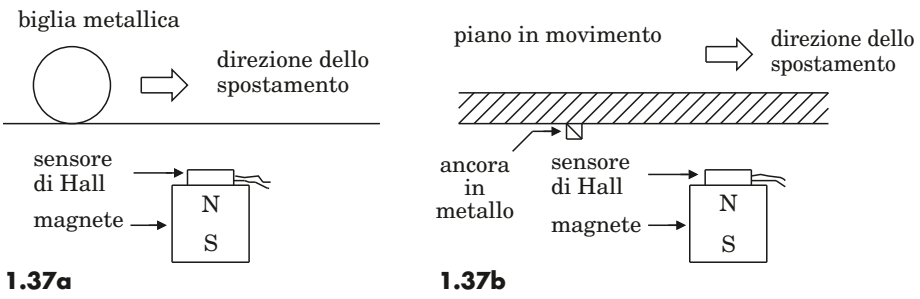
1.36a



1.36b

con un magnete permanente per cui, essendo il campo magnetico costante, presenta in uscita una tensione costante; quando una massa metallica perturba il campo, anche la tensione di uscita del sensore varia. Un circuito elettronico sfrutta questo segnale per effettuare misure di distanza oppure per rilevare la posizione della massa metallica (▸ ***Figg. 1.37a, b***).

Figg. 1.37a, b
Trasduttore di posizione realizzato con un sensore di Hall:
a. misura di distanza;
b. misura di posizione.



La ***figura 1.38*** mostra l'utilizzo di un sensore di Hall nella realizzazione di una dinamo tachimetrica con una ruota dentata capace di modificare, con la sua velocità di rotazione, il campo magnetico generato dal magnete permanente.

Nel campo delle misure il sensore di Hall è usato per misurare la corrente (▸ ***Fig. 1.39***) che fluisce in un conduttore senza intervenire su di esso (**pinza amperometrica**) o per l'analisi strutturale di superficie dei metalli (▸ ***Fig. 1.40***).

Le ***figure 1.41a, b*** presentano due circuiti che impiegano i sensori di Hall: il primo mostra lo schema di interfacciamento del sensore con circuiti logici, il secondo un circuito a scatto comandato da un sensore di Hall.

Fig. 1.38
Dinamo tachimetrica realizzata con un circuito integrato con generatore di Hall.

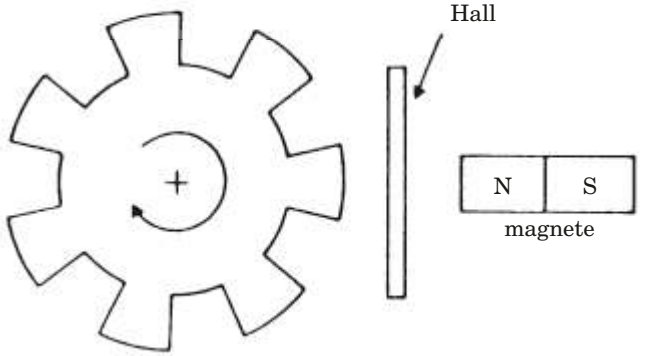


Fig. 1.39
Sensore di Hall utilizzato per misurare l'intensità di corrente in un conduttore senza intervenire su di esso.

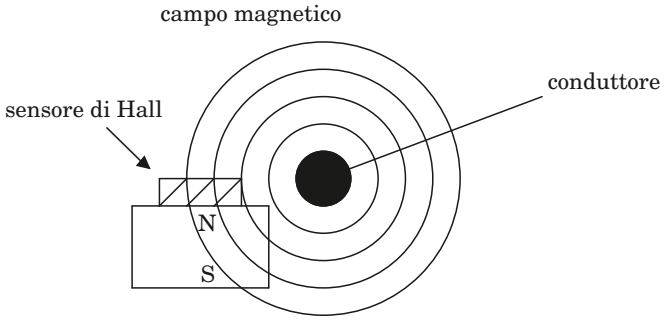
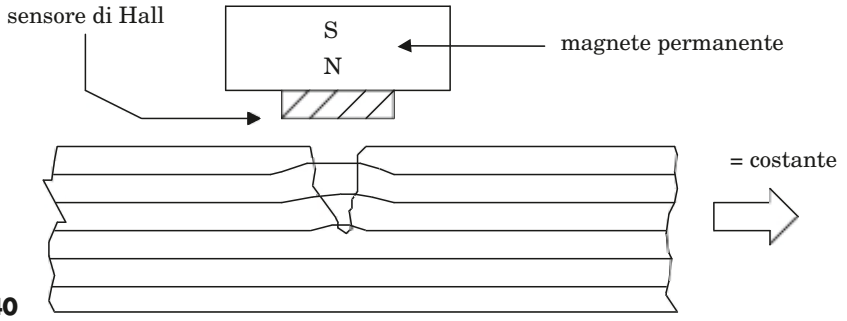
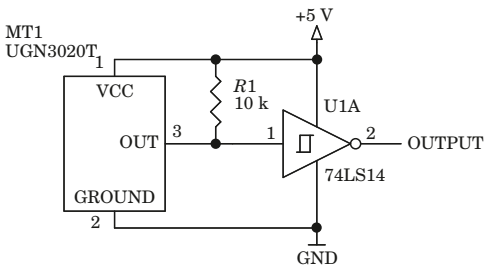


Fig. 1.40
Sensore di Hall impiegato nell'analisi strutturale di superficie dei metalli.

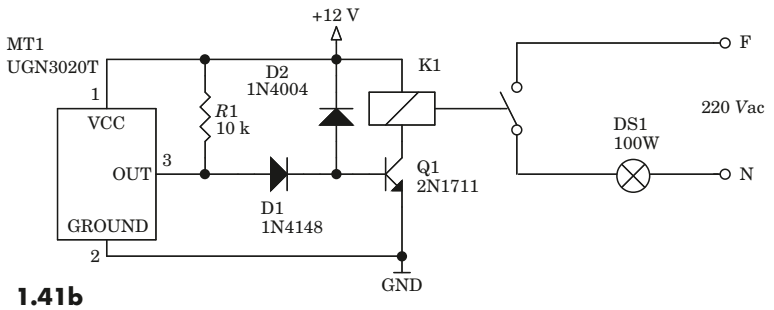


1.40

Figg. 1.41a, b
Circuiti applicativi:
a. interfacciamento di dispositivi logici;
b. interruttore elettronico con uno stadio finale a transistor NPN.



1.41a



1.41b

5 TRASDUTTORI DI PRESSIONE

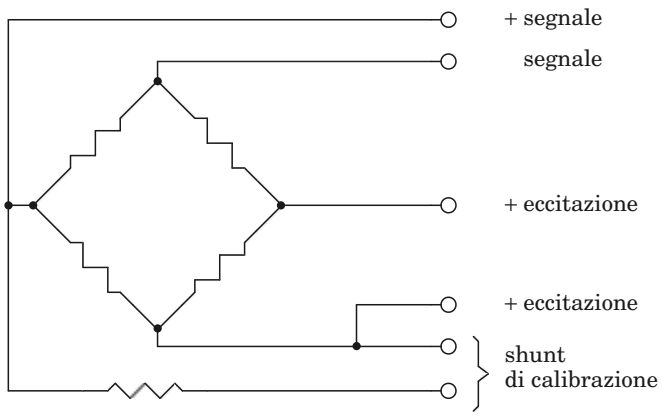
La misura di pressione si effettua misurando la forza che incide su una superficie di area nota. Il trasduttore di pressione si può realizzare utilizzando un ponte di resistenze diffuso su di una membrana; l'elemento sensibile può essere un estensimetro o una piastrina di silicio piezoresistiva.

La forma e le dimensioni (▸ ***Fig. 1.42***) del contenitore dei trasduttori di pressione sono molto varie, mentre i materiali impiegati sono scelti tenendo conto delle condizioni ambientali di impiego. Alcune realizzazioni uniscono nello stesso contenitore, oltre all'elemento sensibile e al circuito a ponte di Wheatstone, anche l'amplificatore del segnale di sbilanciamento, fornendo in uscita tensioni con campi di variazione da 0 a 10 V (▸ ***Fig. 1.43***). Questi trasduttori sono utilizzati in applicazioni biomediche e negli impianti chimici e di processo.

Fig. 1.42
Forme costruttive dei trasduttori di pressione (*fonte*: Omega).

1.42

Fig. 1.43
Schema di connessione di un tipico trasduttore di pressione.



1.43 resistenza di calibrazione

Un trasduttore di pressione estensimetrico comprende (▸ ***Fig. 1.44***):

— la **membrana** che si deforma sotto l'effetto della pressione e che, oltre un certo valore di sovrapressione, si appoggia sulla superficie di arresto sovrastante; questo accorgimento permette di salvaguardare il sensore e di prolungarne la vita operativa;
— l'**asta di trasmissione** della forza e d'isolamento termico, che trasmette la deformazione della membrana all'elemento di misura;
— l'**elemento di misura**, formato da due mensole collegate da una chiocciola centrale che ha la funzione di annullare gli effetti dell'espansione termica trasversale del trasduttore; su ciascuna delle due mensole sono cementati due estensimetri fotoincisi che lavorano a flessione costituendo nell'insieme un ponte estensimetrico attivo completo;
— gli **elementi elettrici** per la compensazione termica;
— il **filtro dell'aria**, collegato attraverso un condotto allo spazio sovrastante e quindi all'atmosfera;
— lo **spazio per l'elettronica** utilizzato per i trasduttori e per i circuiti elettronici di condizionamento del segnale di uscita;
— il **connettore di uscita**.

In altri tipi di trasduttore estensimetrico l'elemento sensibile viene incollato direttamente alla membrana o avvolto su un telaio di deformazione.

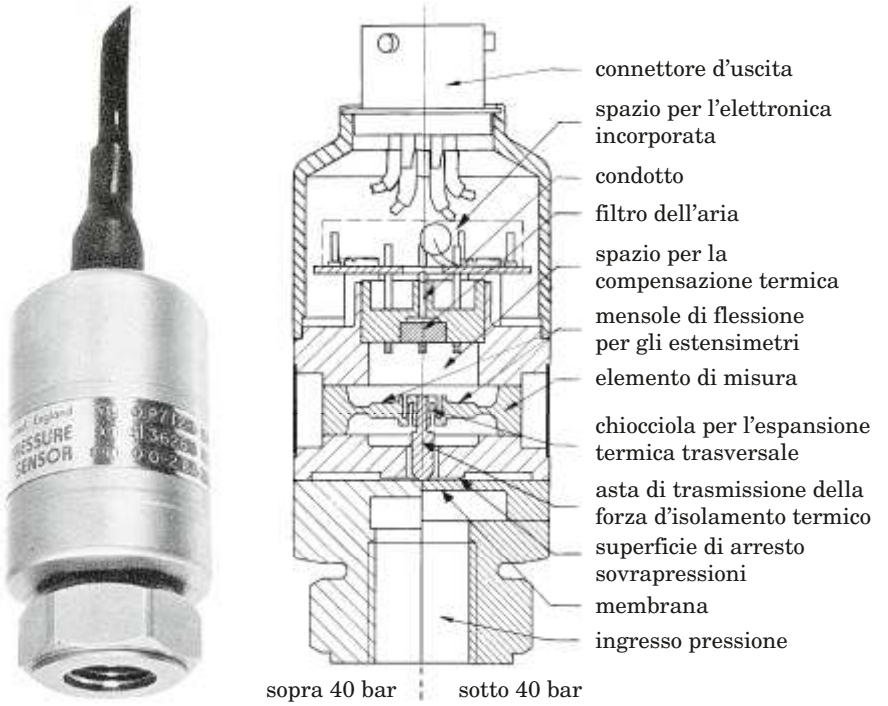


Fig. 1.44
Sezione di un trasduttore di pressione estensimetrico.

6 TRASDUTTORI DI TEMPERATURA

I trasduttori di temperatura trasformano una variazione di temperatura in variazione di un parametro elettrico. Il loro campo di applicazione può essere di tipo industriale, civile e biomedico.

RTD
– Resistance temperature detector

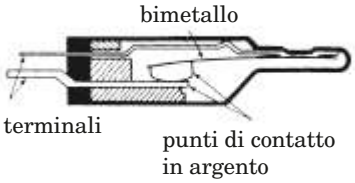


Fig. 1.45
Struttura di un sensore bimetallico.

I trasduttori di temperatura più utilizzati sono:
— sensori bimetallici;
— termistori;
— dispositivi **RTD**;
— sensori a circuito integrato;
— termocoppie.

Sensori bimetallici

I sensori bimetallici, molto comuni e poco costosi (▸ ***Fig. 1.45***), vengono utilizzati per proteggere componenti e apparecchiature dai danni dovuti al surriscaldamento; sono costituiti da un bimetallo tarato a una temperatura di 52 ÷ 70 °C, per i modelli comuni, e di 50 ÷ 130 °C per quelli speciali. Quando la temperatura raggiunge quella di taratura (di esercizio) del bimetallo, il sensore scatta e attiva un contatto interruttore monopolare isolato elettricamente dalla staffa di montaggio (▸ ***Fig. 1.46***).
Il sensore bimetallico è realizzato in due versioni:
— a contatto di lavoro (si chiude con l'aumento della temperatura);
— a contatto di riposo (si apre con l'aumento della temperatura).

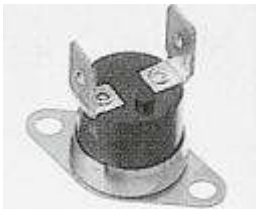


Fig. 1.46
Termostato industriale bimetallico (*fonte*: RS).

larghezza 30 mm ∅ 16 mm
altezza (incl. terminali) 21,4 mm
fori di fissaggio 23,8 x 3,5 mm

Specifiche tecniche:
valore nominale di contatto:
250 V ~ 10 A, 30 V = 5 A
resistenza del contatto: 50 mΩ
potenza dielettrica: 2000 V ~
corpo in materiale plastico: fenolico
cappuccio/staffa di fissaggio:
acciaio inossidabile
durata elettrica: 10^5 operazioni

La versione **a contatto di lavoro** viene impiegata per attivare ventole di raffreddamento quando viene raggiunta la temperatura di scatto (per esempio, quando l'acqua del circuito di raffreddamento in un autoveicolo raggiunge la temperatura massima), mentre la versione **a contatto di riposo** è utilizzata come interruttore di limitazione termica (per esempio, per controllare il surriscaldamento della pompa dei frigoriferi). Tutti i sensori bimetallici si azzerano quando la temperatura scende al livello di azzeramento, di solito corrispondente a 15 °C al di sotto della temperatura d'esercizio. Sono sensori molto lenti.

Termistori

I termistori sono dispositivi composti da materiali semiconduttori sinterizzati che hanno la proprietà di modificare, entro ampi campi di variazione, la propria resistenza al variare della temperatura (▸ ***Vol. 1***, ***Mod. B***, ***Cap. 4***). Sono quasi tutti caratterizzati da un coefficiente di temperatura negativo (**NTC**). Sono più sensibili delle **termocoppie** e possono essere impiegati per misure di temperatura fino a 400 °C; sono fragili per cui è necessario evitare che siano sottoposti a urti e vibrazioni.

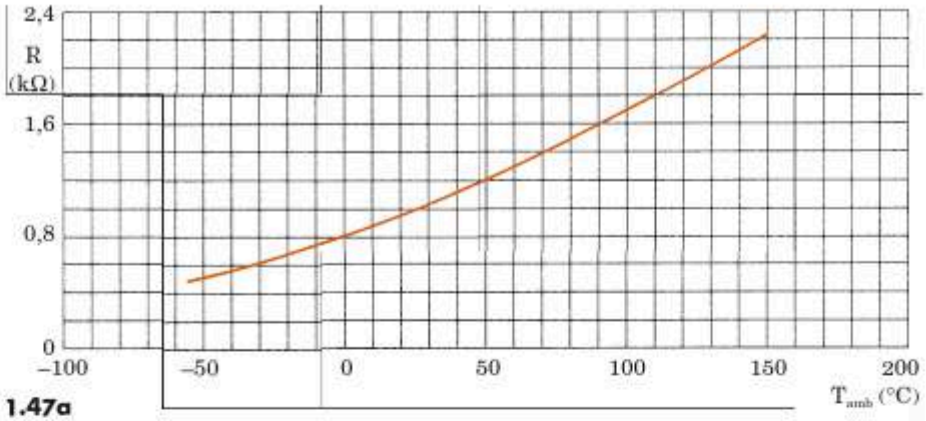
Un particolare tipo di termistore PTC è il KTY della Siemens, che è in grado di misurare temperature comprese tra –50 e +150 °C e che presenta a 25 °C una resistenza di circa 1 kΩ. Il principio di trasduzione si fonda sulla generazione di coppie elettrone-lacuna nel semiconduttore dovuta alle variazioni di temperatura. La resistività del materiale cresce all'aumentare della temperatura in modo molto più rapido che in un trasduttore metallico (termoresistenza). La variazione della resistenza non è però lineare (▸ ***Figg. 1.47a, b***): la curva è simile a una parabola. La caratteristica può però essere linearizzata in un ristretto campo di temperature ponendo in serie o in parallelo al sensore KTY una resistenza. Il valore della resistenza può essere ricavato da apposite curve caratteristiche fornite dal costruttore, che mettono in relazione il valore della resistenza da inserire con quello della temperatura di riferimento intorno alla quale s'intende linearizzare la caratteristica di trasferimento del trasduttore.

NTC
– Negative temperature coefficient

Figg. 1.47a, b
Curva caratteristica resistenza-temperatura del termistore KTY (*fonte*: Philips):

a. diagramma resistenza-temperatura;

b. parametri elettrici caratteristici del trasduttore.



1.47a

Resistance I_C = 1 mA	KTY81-110 KTY81-120 KTY81-121 KTY81-122 KTY81-150 KTY81-151 KTY81-152	R_{25} R_{25} R_{25} R_{25} R_{25} R_{25} R_{25}	990 - 1010 Ω 980 - 1020 Ω 980 - 1000 Ω 1000 - 1020 Ω 950 - 1050 Ω 950 - 1000 Ω 1000 - 1050 Ω
Temperature coefficient	typ.		0.79 %/K
Resistance ratio	R100/R25 R–55/R25		1.696 ± 0.020 0.490 ± 0.010
Thermal time constant in still air in still liquid in flowing liquid	 typ. typ. typ.		 30 s 5.0 s 3.0 s
Measuring temperature range			–55 to +150 °C

T_{amb} °C	Resistance Ω	T_{amb} °C	Resistance Ω
–55	490	50	1209
–50	515	60	1299
–40	567	70	1392
–30	624	80	1490
–20	684	90	1591
–10	747	100	1696
0	815	110	1805
10	886	120	1915
20	961	130	2023
25	1000	140	2124
30	1040	150	2211
40	1122		

Ambient temperature and corresponding average resistance values of sensor (I_C = 1 mA).

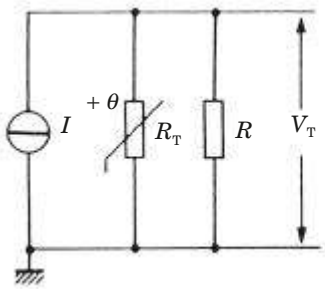
1.47b

Le ***figure 1.48a, b, c*** mostrano le reti elettriche di linearizzazione e l'errore di temperatura ottenuto con una resistenza di linearizzazione di 2870 Ω.

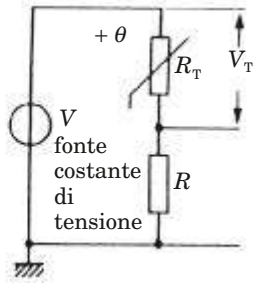
Dispositivi RTD

I dispositivi RTD sono costituiti da un sottile strato metallico depositato su un substrato piatto di ceramica. La resistenza elettrica dello strato metallico aumenta al variare della temperatura con un coefficiente di tempera-

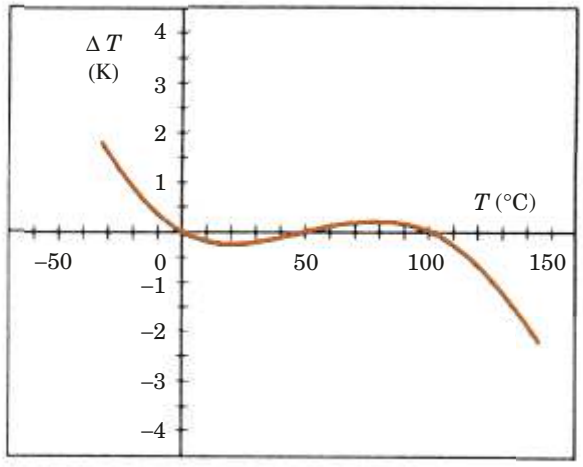
Figg. 1.48a, b, c
Circuiti di linearizzazione della caratteristica resistenza-temperatura (*fonte*: Philips):
a. circuito parallelo;
b. circuito serie;
c. curva caratteristica.



1.48a

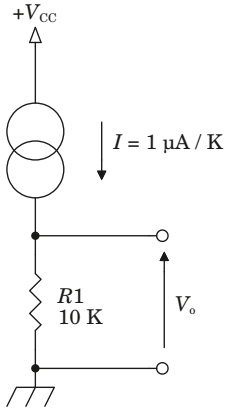


1.48b

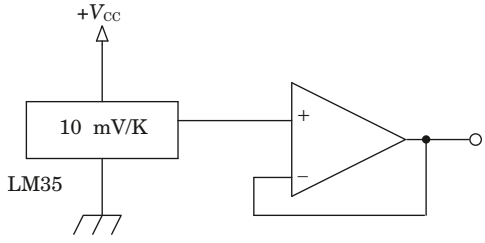


1.48c

Figg. 1.49a, b
Sensore di temperatura a circuito integrato:
a. sensore di corrente;
b. sensore di tensione.



1.49a



1.49b

PTC
– Positive temperature coefficient

tura positivo (PTC). I materiali usati per realizzare lo strato metallico sono: oro, argento, rame, platino, tungsteno, nichel (▸ ***Vol. 1, Mod. B, Cap. 4***).

Sensori a circuito integrato

I sensori a circuito integrato realizzano l'operazione di conversione sfruttando la deriva termica della giunzione PN (▸ ***Figg. 1.49a, b***). In genere questi circuiti, completati anche dal circuito di linearizzazione e di ampli-

ficazione, agiscono come generatori di corrente ad alta impedenza dipendenti dalla temperatura con un'uscita misurata in μA/K. Un sensore a circuito integrato con uscita in corrente, molto utilizzato, è prodotto dalla Analog Devices: l'AD590. La National Semiconductors produce sensori a circuiti integrati con uscita in tensione proporzionale alla temperatura misurata in gradi centigradi (LM34 e LM35), e alla temperatura misurata in gradi assoluti (LM135/235/335). Il campo di temperature in cui possono funzionare correttamente è compresa tra –50 e +150 °C.

Possiedono una buona stabilità e accuratezza, per cui si possono ottenere risoluzioni che variano da ±0,1 ÷ ±0,5 °C.

Il **simbolo grafico** che rappresenta il trasduttore è quello del generatore dipendente di corrente.

I sensori a circuito integrato, grazie all'uscita in corrente ad alta impedenza, sono insensibili alle cadute di tensione anche se la linea di trasmissione è particolarmente lunga; sono quindi particolarmente adatti ai controlli di temperatura remoti, cioè a quelle applicazioni in cui l'apparecchiatura di misura e controllo si trova a considerevole distanza dal sensore. Possono però essere usati solo a temperature basse, a causa dei limiti fisici dei semiconduttori.

Un progetto completo che utilizza il circuito AD590 per realizzare un termometro elettronico è stato illustrato nel ***Volume 2, Mod. C***, Applicazione 4, scaricabile dal sito Internet.

Termocoppie

Le termocoppie vengono costruite unendo due metalli differenti. Se le temperature dei due punti di giunzione ai capi del circuito sono differenti, si misura una forza elettromotrice (**effetto termoelettrico** o effetto Seebeck) il cui valore dipende dai materiali e dalla differenza fra le temperature (▸ ***Fig. 1.50***). La giunzione utilizzata per effettuare la misura è detta **giunzione calda** mentre l'altra è detta **giunzione di riferimento** o **fredda** (*cold junction*).

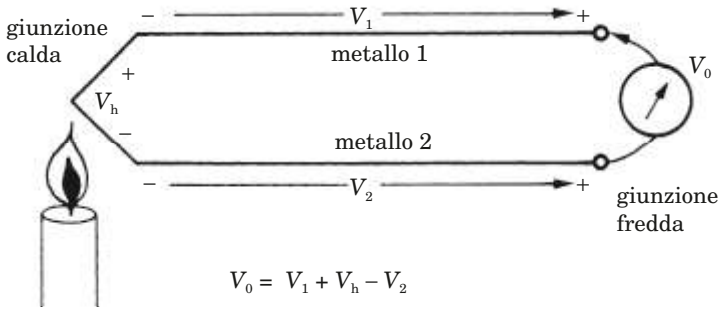


Fig. 1.50
Termocoppia.

Supponiamo di scaldare una barra di metallo a un'estremità: a causa dell'aumento dell'agitazione termica, provocato dal riscaldamento, si liberano elettroni che tendono a diffondersi verso l'estremità fredda; parallelamente, si crea una forza che cerca di diffondere gli ioni positivi, che però sono bloccati nel reticolo cristallino della struttura metallica e non possono migrare. Per ogni elettrone che si sposta rimane uno ione positivo, che tende a richiamare indietro l'elettrone stesso con una forza che è data dalla legge di Coulomb, e che può essere rappresentata da un campo elettrico orientato dalla zona calda verso quella fredda. Il campo elettrico pro-

EFFETTO PELTIER
– Variazione di temperatura che si produce nei punti di saldatura tra conduttori metallici di natura diversa attraversati da corrente elettrica. Il verso della corrente determina un aumento o una diminuzione della temperatura

EFFETTO SEEBECK
– Se le giunzioni di due conduttori, costituiti da materiali diversi, di un circuito chiuso, si trovano, a temperature differenti si genera un passaggio di corrente elettrica. Si rilevano fem di pochi millivolt e il verso della corrente dipende dalla natura dei materiali conduttori e dalla disposizione dei conduttori attorno al contatto

duce una tensione, chiamata **forza elettromotrice di Thomson**. Lo stesso principio descritto si applica a una giunzione fra due metalli diversi, dove le differenti densità degli elettroni provocano la diffusione degli elettroni fra i metalli, generando una forza elettromotrice. Il fenomeno è noto come **EFFETTO PELTIER**; le termocoppie sfruttano sia l'effetto Thomson sia quello Peltier per generare la tensione termoelettrica. L'insieme dei due effetti è detto **EFFETTO SEEBECK**.

Poiché per le termocoppie è difficile ricavare equazioni parametriche che permettano di valutare esattamente la relazione forza elettromotrice-temperatura, per stabilire una relazione di tipo biunivoco occorre effettuare un'operazione di calibrazione. Le termocoppie devono essere installate utilizzando particolari tecniche di montaggio. I fili di connessione della termocoppia con lo strumento di misura, di solito di rame, formano con la prima due giunzioni che manifestano le sue stesse proprietà termoelettriche. Il montaggio deve perciò essere effettuato in modo tale che gli effetti di queste due giunzioni si compensino, e ciò viene ottenuto utilizzando fili di connessione di materiale identico e con caratteristiche geometriche (sezione, lunghezza) uguali.

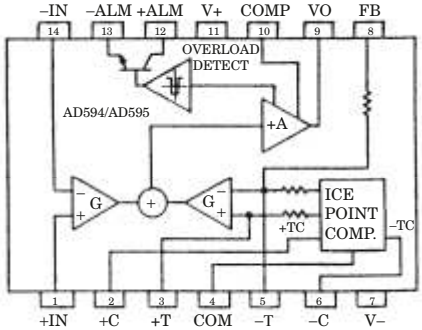
Le termocoppie sono usate per misurare temperature di –255 ÷ 1500 °C. La tensione di uscita di solito varia fra –10 ÷ +50 μV e ha una sensibilità media di 10 ÷ 50 μV/°C in funzione del tipo di termocoppia utilizzata.

Le termocoppie più comuni sono realizzate con rame-constantana (*T-type*), ferro-constantana (*J-type*), cromel-constantana (*E-type*), cromel-alluminio (*K-type*), platino-platino/13% rodio (*R-type*), platino-platino/10% rodio (*S-type*), platino/6% rodio-platino/30% rodio (*B-type*).

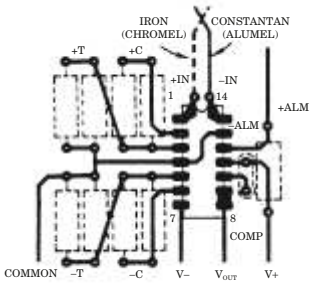
Le termocoppie sono identificate da appositi colori e tipi, elencati nelle norme di riferimento: USA (ANSI MC96-1-82), europee (IEC 584-1:1977), italiane (CTI-UNI 7838), tedesche (DIN 43710).

Il segnale generato dalle termocoppie è di pochi millivolt, per cui è sempre necessario aggiungere un circuito di amplificazione. Vengono realizzati circuiti integrati come l'AD594, che permettono di effettuare misure usando una sola termocoppia (▸ ***Fig. 1.51a, b, c***); il circuito integrato contiene il circuito di compensazione relativo al punto zero di riferimento, il circuito di amplificazione del segnale di uscita e quello di linearizzazione; la tensione di uscita varia in modo proporzionale di 10 mV/°C.

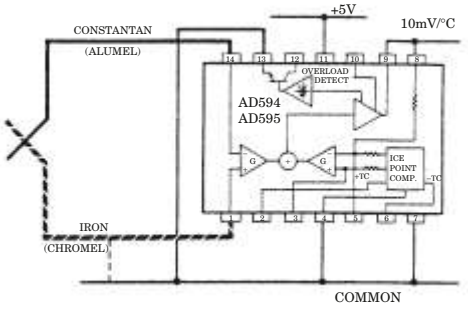
Figg. 1.51a, b, c
Circuito di amplificazione per termocoppie che utilizza il circuito integrato AD594:
a. schema a blocchi;
b. layout delle piste del circuito stampato;
c. schema di connessione.



1.51a



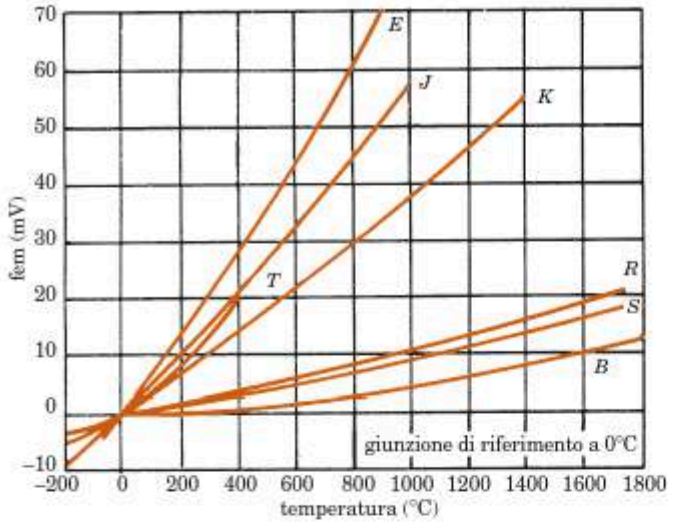
1.51b



1.51c

La ***figura 1.52*** mostra alcune curve caratteristiche forza elettromotrice-temperatura di vari tipi di termocoppia.

Fig. 1.52
Curve caratteristiche forza elettromotrice-temperatura per termocoppie.



Rispetto ai termistori, le termocoppie presentano alcuni vantaggi: sono meno ingombranti, possiedono un'elevata velocità di risposta, sono di facile installazione, hanno un campo di misura molto esteso. I termistori offrono il vantaggio di essere più precisi e più stabili.

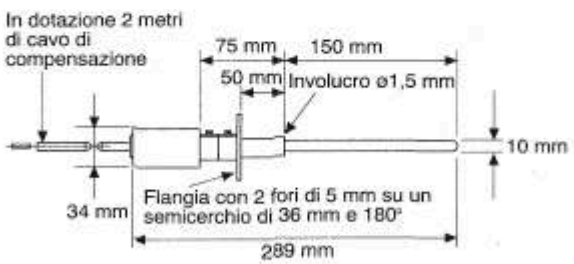
Simbolo grafico e lettera di identificazione

La termocoppia viene rappresentata con un segno che evidenzia i suoi due elementi metallici e il terminale positivo, ed è identificata con la stessa sigla usata per il trasduttore generico: MT (▸ ***Fig. 1.53***). Le ***figure 1.54a, b*** mostrano la forma costruttiva di una termocoppia industriale.

Fig. 1.53
Simbolo grafico della termocoppia.

1.53

1.54a



1.54b

Figg. 1.54a, b:
a. forma costruttiva di una termocoppia industriale (*fonte*: RS);
b. sua rappresentazione dimensionale.

Specifiche tecniche:
modello R in platino/rodio 13%
in conformità alla BS 4937 parte 2
temperatura massima continua:
1350 °C

Il modello R è una termocoppia di metallo nobile usata diffusamente dove sussistono temperature elevate, come nei forni per ceramica (sia per scopi industriali che educativi) e nell'industria del vetro.
Grazie al dispositivo di fissaggio a flangia regolabile, questo tipo di termocoppia può essere inserita alla profondità desiderata in modo tale da misurare la temperatura nel punto del forno da controllare.
L'elemento è racchiuso in una guaina di porcellana alluminosa che è collegata, per la regolazione, a una prolunga in acciaio dolce.
L'unità è fornita completa di 2 metri di cavo di compensazione.

7 TRASDUTTORI DI LIVELLO

La misura del livello di riempimento di un certo contenitore (vasca, serbatoio) è un'operazione comune in quasi tutti i processi industriali. Per eseguirla si impiegano sensori e apparecchi di comando e di controllo, basati su principi di misura diversi, che permettono il rilevamento, il controllo e il comando di livello di tutti i possibili materiali di riempimento (sostanze liquide o pastose, polverose o granulari).

Elenchiamo di seguito i vari tipi di trasduttore e i diversi fenomeni fisico-chimici su cui si basano (▸ ***Fig. 1.55***).

— **Capacitivo**: misura continua e controllo di livello di liquidi e materiali in pezzatura.
— **Idrostatico**: misura esatta di sostanze fluide e dense.
— **Elettromeccanico**: misura di materiali in pezzatura in silos di una certa altezza.
— **Ecoscandaglio**: misura senza contatto di materiali in pezzatura e liquidi.
— **Vibrazione**: rilevamento di livello di liquidi e materiali in pezzatura.
— **Conduttivo**: rilevamento di livello di liquidi e materiali in pezzatura conduttivi.
— **Radioattivo**: rilevamento senza contatto di liquidi o materiali in pezzatura attraverso le pareti dei serbatoi.
— **Microonde**: rilevamento di livello senza contatto di materiali in pezzatura.
— **Laser**: misura di livello senza contatto a raggio laser all'infrarosso.

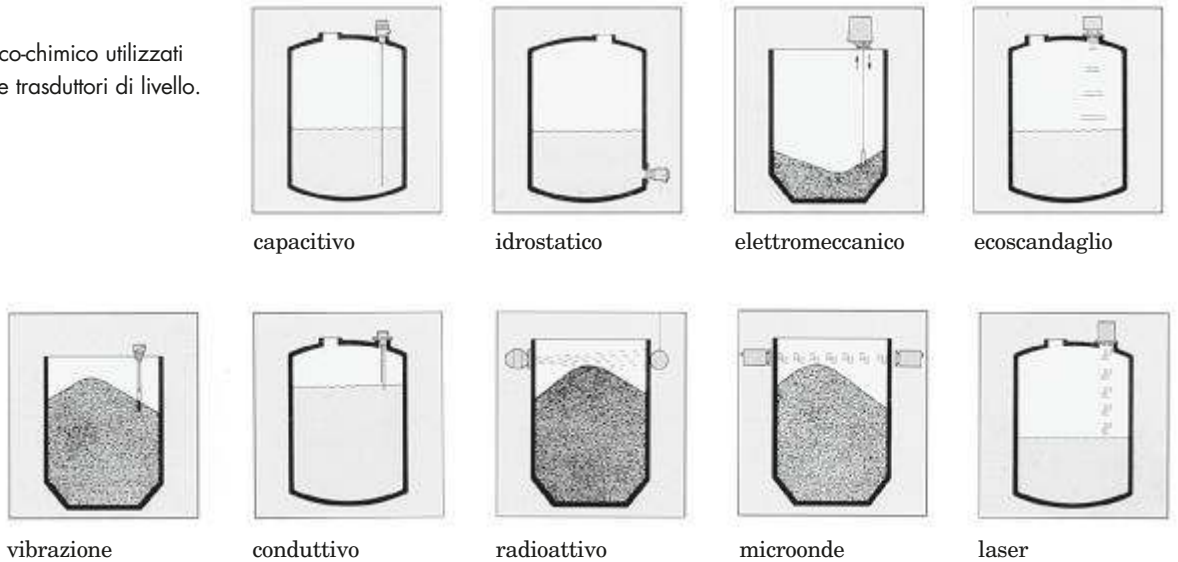


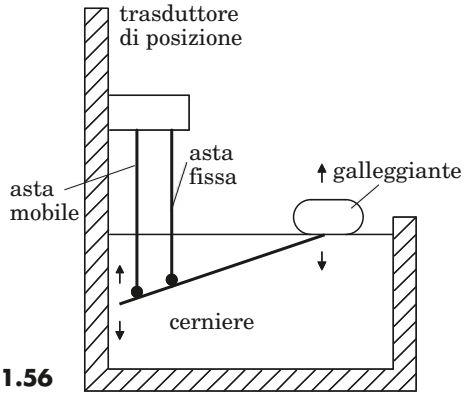
Fig. 1.55
Fenomeni fisico-chimico utilizzati per realizzare trasduttori di livello.

Trasduttori di livello a galleggiante

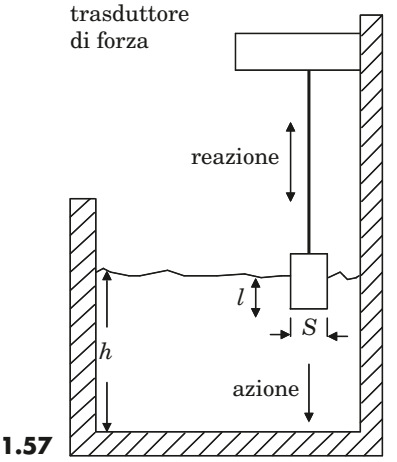
Una misura può essere effettuata in modo diretto o indiretto. La **misura diretta** viene effettuata connettendo un galleggiante con un trasduttore di spostamento o con un trasduttore di forza. L'organo mobile del trasduttore di posizione è azionato da un insieme di leve collegate all'asta del galleggiante (▸ ***Fig. 1.56***).

Fig. 1.56
Sistema a galleggiante per la misura di livello dei liquidi.

Fig. 1.57
Sistema a spinta idrostatica per la misura di livello dei liquidi.



1.56



1.57

La **misura indiretta** può essere effettuata misurando, invece che il livello, la massa di liquido contenuta nel serbatoio (▸ ***Fig. 1.57***). La misura si esegue valutando la spinta (forza) idrostatica che agisce su un corpo immerso (**principio di Archimede**). La profondità di immersione l del corpo dev'essere tale che il peso del volume $(l \cdot S)$ del liquido spostato sia uguale al peso complessivo del corpo. Quindi, a un aumento del livello h del liquido corrisponde un aumento della spinta idrostatica. Se il corpo immerso è collegato meccanicamente con un trasduttore di forza è possibile valutare l'entità della spinta e correlarla con il livello del liquido. La spinta del liquido F (**forza di Archimede**) è pari a:

$$F = l \cdot S \cdot \delta \qquad 1.11$$

dove δ è la densità del liquido

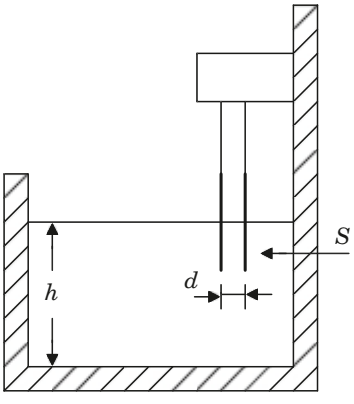
Tale misura è influenzata dalle alterazioni della densità del liquido per effetto della temperatura o della sua composizione.

Trasduttori capacitivi

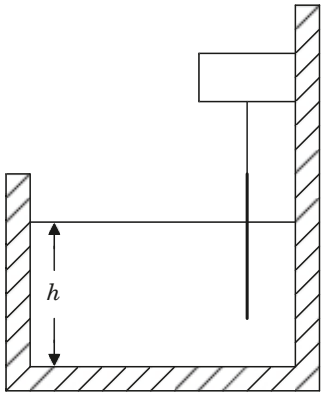
Il trasduttore capacitivo è formato da un condensatore piano le cui due armature assumono la forma di due sonde che vengono immerse nel liquido isolante; quest'ultimo funge da dielettrico (▸ ***Figg. 1.58a, b***).

Figg. 1.58a, b
Trasduttore capacitivo per la misura di livello dei liquidi con caratteristiche elettriche:
a. isolanti;
b. conduttrici.

Fig. 1.59
Trasduttore di livello capacitivo con sonda ricoperta di materiale isolante (*fonte*: Omega).



1.58a



1.58b

1.59

La sezione sommersa degli elettrodi determina la capacità del trasduttore secondo la (1.4). Se il liquido è conduttore, il trasduttore utilizza una sola sonda ricoperta da un materiale isolante (teflon) e il liquido stesso forma la seconda armatura (▸ ***Fig. 1.59***).

8 TRASDUTTORI PER MISURE DI FLUSSO

La misura del flusso dei liquidi è determinante in molti processi industriali. Una misura di flusso non accurata o errata può provocare guasti e incidenti suscettibili di compromettere l'integrità di un impianto industriale, oppure condizionare in modo determinante l'evolvere del processo produttivo, al punto di comprometterne la resa economica.

Il principio operativo fondamentale su cui si basano i **flussometri a pressione differenziale** è che la caduta di pressione sui due lati dello strumento è proporzionale al quadrato della velocità del flusso. Il flussometro viene quindi inserito nel circuito idraulico in modo che il flusso del liquido lo percorra: con opportuni trasduttori o strumenti si valuta poi la differenza di pressione fra l'ingresso e l'uscita.

I flussometri a pressione differenziale sono formati da due elementi: primario e secondario.

L'**elemento primario** provoca un cambiamento di energia cinetica che crea il mutamento della pressione nel tubo; l'elemento dev'essere adatto a: dimensioni del tubo, condizioni del flusso e proprietà del liquido.

L'**elemento secondario** misura la pressione differenziale e genera il segnale che viene convertito nel corrispondente valore del flusso.

Esistono vari tipi di flussometro a pressione: a flangia tarata, a tubo di Venturi, a tubo di Pitot ecc. Ne descriveremo due:

— a flangia tarata;
— a tubo di Venturi.

Per un più approfondito esame di questo argomento rimandiamo ai testi sull'automazione industriale e di meccanica, che sviluppano l'argomento in modo completo e specializzato.

Le **flange tarate** che costituiscono il tipo di flussometro più diffuso sono formate da una piastra di metallo con un foro appositamente dimensionato, che può essere concentrico o eccentrico rispetto al flusso, di forma circolare, conica o quadrata. In pratica, la piastra viene installata nel tubo serrandola tra due flange (▸ ***Fig. 1.60***).

La flangia tarata opera come elemento primario, costringendo il flusso del liquido a produrre una pressione differenziale tra le due lastre. I due rubinetti di pressione, posti su entrambi i lati della piastra, sono utilizzati per misurare la differenza di pressione.

Il principale vantaggio delle flange tarate consiste nell'assenza di organi in movimento e nel costo, che è sostanzialmente indipendente dalle dimensioni del tubo su cui si esegue la misura.

Questo tipo di flussometro viene utilizzato con liquidi che presentano **numeri di Reynolds** bassi. Si ricorda che il numero di Reynolds (R_e) è adimensionale e tiene conto della forza di gravità (G_t), della velocità del flusso (Q), della viscosità del liquido (ρ) e del diametro interno del tubo (d). Con questo numero è quindi possibile classificare i vari tipi di moto di un

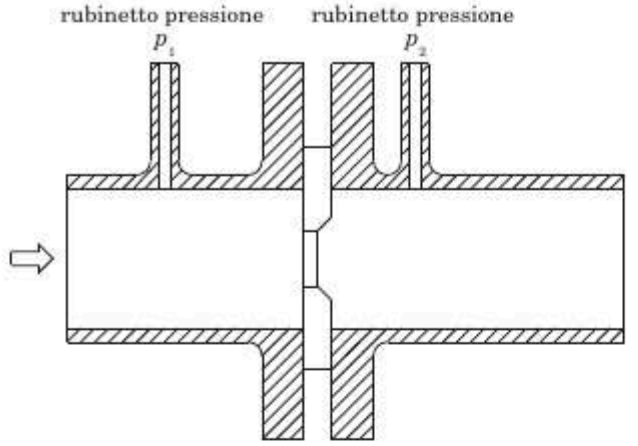


Fig. 1.60
Flussometro a flangia tarata.

liquido in un tubo (▸ ***Figg. 1.61a, b, c***). L'accuratezza della misura è fortemente influenzata dalle condizioni di installazione, dall'area della flangia e dalle proprietà del fluido che scorre nel tubo.

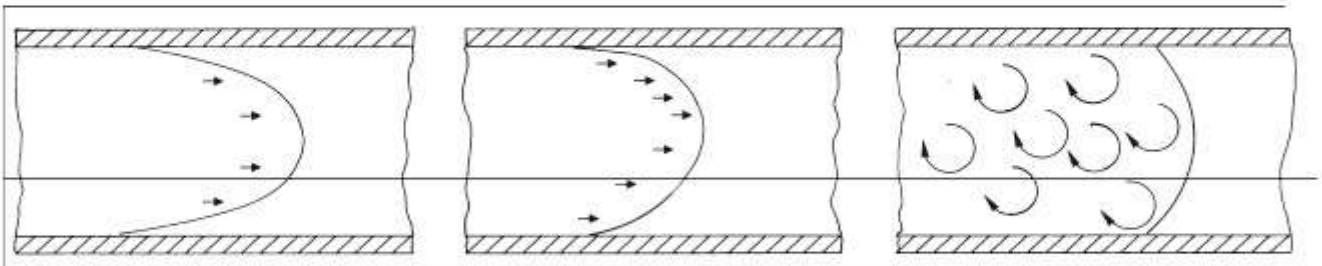
I **tubi di Venturi** (▸ ***Fig. 1.62***) offrono il vantaggio di misurare flussi molto grandi con cadute di pressione basse e sono costituti da una sezione di tubo con ingresso provvisto di un rubinetto e di una gola diritta: quando il liquido passa attraverso la gola, la sua velocità aumenta generando una pressione differenziale.

Non hanno parti in movimento e possono essere installati in tubi di grande diametro utilizzando delle flange idonee. I tubi di Venturi possono essere utilizzati con vari tipi di liquido, inclusi quelli che contengono particelle solide.

Figg. 1.61a, b, c
Moto dei fluidi in una tubazione:
a. flusso laminare uniforme;
b. flusso laminare non uniforme;
c. flusso turbolento.

$$R_e = \frac{3160 \cdot Q \cdot G_t}{d \cdot \rho}$$

dove:
R_e numero di Reynolds
Q velocità
ρ coefficiente di viscosità del liquido
G_t forza di gravità
d diametro interno del tubo



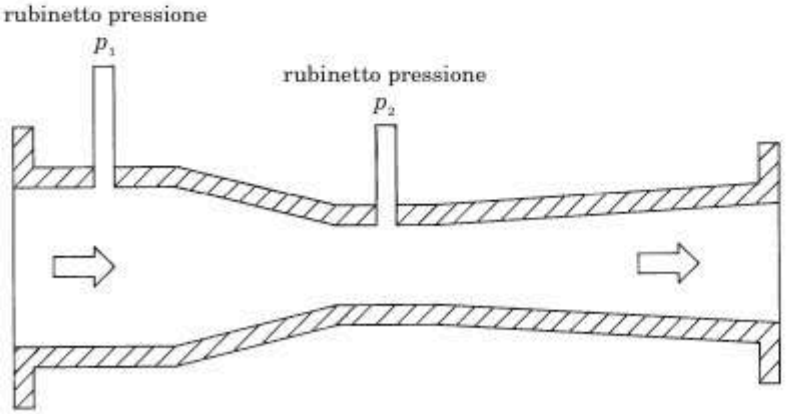


Fig. 1.62
Flussometro a tubo di Venturi.

Una tecnica di misura differente ricorre invece all'uso di flussometri che utilizzano gli ultrasuoni sfruttando l'***effetto Doppler*** (▸ ***Fig. 1.63***). Gli strumenti a ultrasuoni a effetto Doppler possiedono un elemento trasmittente e un elemento ricevente posizionato sull'esterno del tubo. Il trasmittente invia un impulso a frequenza ultrasonica verso il liquido che scorre nel tubo; l'onda sonora, incontrando particelle solide, bolle o una qualsiasi discontinuità nel liquido, riflette l'impulso verso l'elemento ricevente. La frequenza dell'onda ricevuta risulta spostata rispetto a quella trasmessa in modo proporzionale alla velocità del liquido.

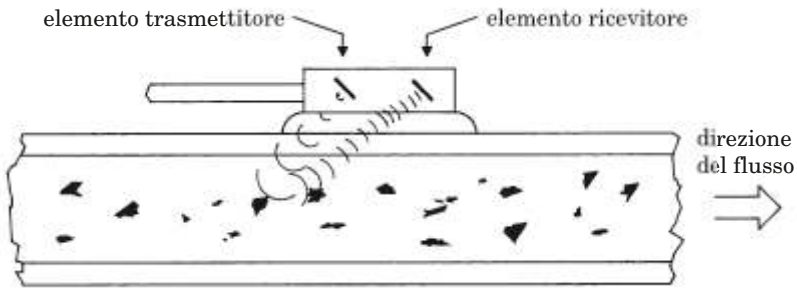


Fig. 1.63
Flussometro a ultrasuoni.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Quali sono i campi di applicazione tipici dei sensori bimetallici?
2. Quali svantaggi comporta l'utilizzo delle termocoppie?
3. Indica alcuni metodi per eseguire le misure di livello dei liquidi e dei solidi in serbatoi o silos.
4. Descrivi il principio di funzionamento di un flussometro.

9 SENSORI A FIBRE OTTICHE

Un'altra importante applicazione delle fibre ottiche è quello della strumentazione di misura, sfruttando tecniche interferometriche o di modulazione dell'indice di rifrazione. In alcuni casi, per misurare spostamenti micrometrici ci si avvale della modulazione del fascio luminosa ottenuta con il non allineamento coassiale fra due sezioni di fibra affacciate.

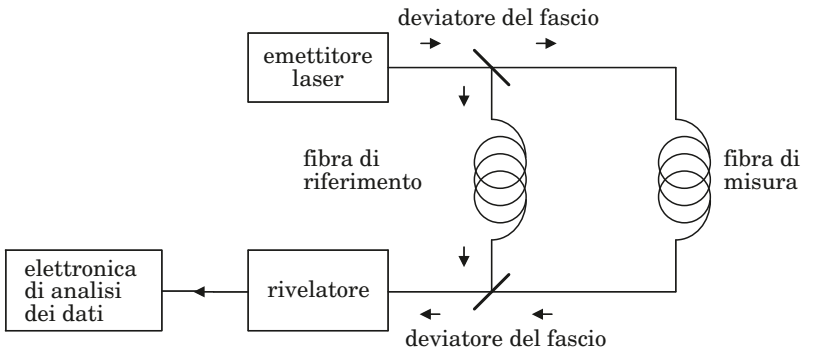
I parametri misurabili sono di tipo meccanico (forza, pressione, spostamento), magnetico (intensità di campo, polarizzazione), ambientale (temperatura). I sensori a fibre ottiche, per la loro insensibilità alle radiazioni elettromagnetiche e alle condizioni ambientali, sono in grado di risolvere problemi di misura altrimenti insolubili. Sono state realizzate decine di sensori che permettono di rilevare sforzi, deformazioni, vibrazioni meccaniche e velocità di rotazione inerziale di un organo rotante con grande precisione.

I sensori a fibra ottica (SFO) vengono classificati, in funzione del tipo di fibra utilizzata, in monomodo e multimodo.

Il **sensore a fibra ottica monomodo** sfrutta la tecnica interferometrica mediante due fibre montate in **configurazione Mach-Zender**

(▸ ***Fig. 1.64***). La misura della grandezza fisica si concretizza in quella della variazione di fase subita dal fascio elettronico che attraversa la fibra perturbata rispetto al fascio elettronico che percorre quella di riferimento. Questa tecnica è stata utilizzata per realizzare sensori di vibrazione, pressione, velocità e temperatura.

Fig. 1.64
Sistema a fibra ottica monomodo.



Dal punto di vista costruttivo, i **sensori a fibra ottica multimodo** possono essere suddivisi in tre sottoclassi (▸ ***Figg. 1.65a, b, c***):

1. SFO elettro-ottico;
2. SFO con trasduttore ottico discreto;
3. SFO propriamente detto.

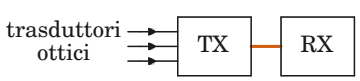
I sistemi a fibra ottica del **tipo elettro-ottico** sono formati da uno o più trasduttori elettrici tradizionali accoppiati a un sistema di trasmissione in fibra ottica. I segnali elettrici che contengono l'informazione riguardante la grandezza misurata sono convertiti in segnali ottici da un diodo led (o laser) che li invia al ricevitore remoto utilizzando una fibra multimodale. Questa tecnica di misura non può essere utilizzata in ambienti potenzialmente esplosivi perché in questo caso non si può porre nelle immediate vicinanze del trasduttore la necessaria fonte di alimentazione elettrica.

I sistemi a fibre ottiche del **tipo discreto** utilizzano le variazioni, in funzione della grandezza da misurare, delle caratteristiche fisiche di un materiale (per esempio un cristallo) per modulare il fascio luminoso che lo attraversa. La fibra ottica trasmette la luce dalla sorgente al trasduttore e da quest'ultimo al rivelatore.

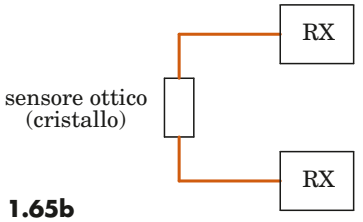
Negli **SFO propriamente detti**, la fibra ottica, oltre che da mezzo di trasmissione funge anche da l'elemento di trasduzione. Nella maggior parte delle tecniche, la misurazione della grandezza fisica consiste nel valutare l'attenuazione del segnale luminoso.

Figg. 1.65a, b, c
Classificazione dei sistemi a fibra ottica:
a. SFO elettro-ottico;
b. SFO con trasduttore ottico discreto;
c. SFO propriamente detto.

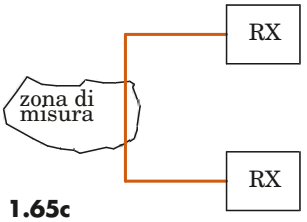
— fibra ottica
TX trasmettitore, sorgente di flusso
RX ricevitore



1.65a



1.65b



1.65c

MODO
– Modo in cui i raggi di luce viaggiano all'interno della fibra ottica. Vi sono vari modi in quanto i raggi di luce possono essere riflessi internamente alla fibra con angoli diversi

La ***figura 1.66*** mostra un tipico misuratore di livello con sensore a fibra ottica; per un certo tratto la fibra è priva del rivestimento (*cladding*). In una fibra ottica priva di cladding, l'angolo limite e l'apertura numerica (*numerical aperture*) diminuiscono allorché la fibra viene immersa in un liquido; i **MODI** (▸ ***Mod. C***, ***Cap. 6***, scaricabile dal sito Internet) che si propagano nel nucleo (*core*) con grandi angoli abbandonano la guida d'onda causando una maggiore attenuazione della luce trasmessa.

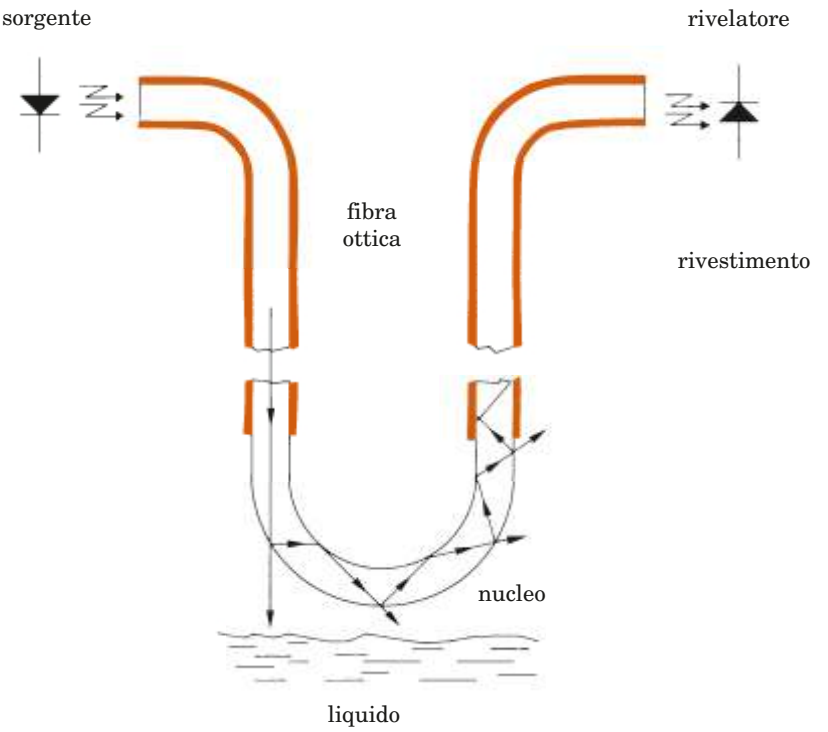


Fig. 1.66
Sensore di livello con fibra ottica multimodo.

10 SENSORI SENSIBILI AL FUMO, AI GAS DI COMBUSTIONE, ALLE FIAMME

I problemi dell'inquinamento atmosferico e la necessità di ottimizzare i processi chimico-fisici hanno molto incentivato la ricerca sui sensori di gas per migliorare la selettività rispetto a un solo tipo di gas, la stabilità a lungo termine e l'insensibilità allo sporco e all'umidità.

In teoria, i fenomeni elettrici che possono essere sfruttati sono molti: la variazione in presenza di gas della resistività, della capacità, della corrente, della conduzione del calore ecc. La variazione della resistività può essere misurata facilmente utilizzando semiconduttori di tipo N a base di ossido di stagno, oppure di tipo P a base di ossido di rame.

Un sensore di ossigeno utilizzato soprattutto nell'industria automobilistica è la **sonda lambda**. Il lambda della combustione è dato dal rapporto fra ossigeno e combustibile: se lambda è minore di uno la miscela è grassa e lo scarico contiene ossido di carbonio, se lambda è maggiore di uno la miscela è magra e si generano ossidi di azoto. L'inquinamento è minimo con lambda uguale a uno.

La ***figura 1.67*** mostra la struttura e il principio di funzionamento della sonda lambda: il sensore è un elettrodo di ossido di zirconio che costituisce un elettrolita solido ceramico, drogato con ossido di ittrio o di calcio, che conduce ioni di ossigeno. Le superfici interna ed esterna del tubo sono ricoperte di metalli nobili che si comportano da elettrodi, di cui uno è immerso nel gas di scarico e l'altro nell'atmosfera. La temperatura di funzionamento è di circa 650 °C e viene raggiunta tramite una resistenza elettrica di riscaldamento. Fra gli elettrodi viene applicata una differenza di potenziale compresa fra 0,4 e 1 V; il rapporto fra questa tensione e la corrente circolante nella sonda fornisce una misura della concentrazione di ossigeno nel gas di scarico.

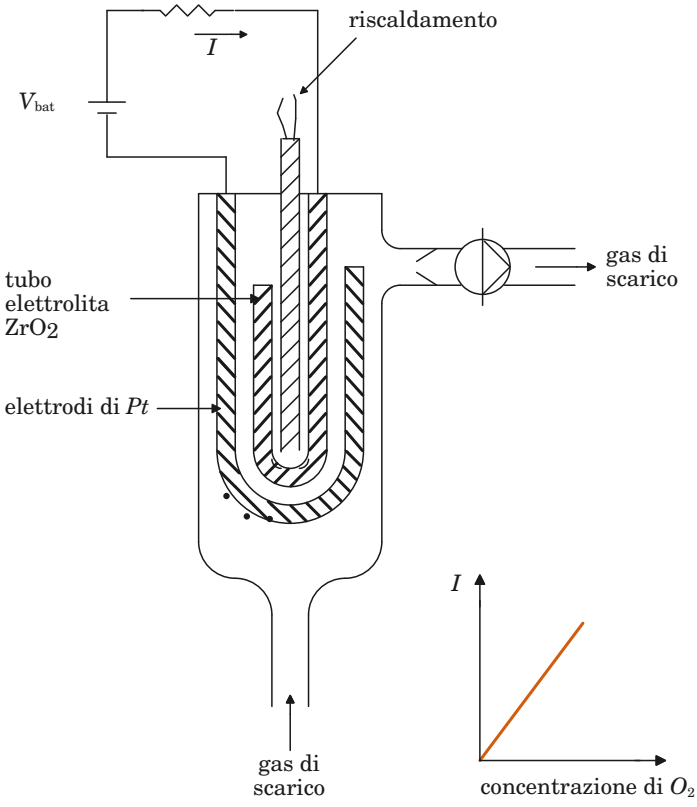


Fig. 1.67
Struttura di una sonda lambda per la misura della concentrazione dell'ossigeno nei gas di scarico degli autoveicoli.

Sensori sensibili al fumo

I sensori sensibili al fumo più semplici sono costituiti da una camera in cui è posta una sorgente luminosa e un ricevente (fotodiodo, fototransistor); in presenza di fumo, l'intensità luminosa che incide sul ricevitore varia modificando il suo stato di conduzione. Questo sensore non discrimina la sorgente del fumo (vapore acqueo, fumo di sigaretta, fumo da combustione, fuga di metano o di altri gas).

Sensori di combustione

Un altro tipo di sensore, detto a **doppia camera di combustione**, è più sensibile ed è in grado di rilevare i **gas di combustione invisibili**. Il sensore è costituito da due elettrodi: uno è formato dalla struttura di copertura esterna del sensore stesso, l'altro, l'elettrodo di collettore, si trova nella camera di ionizzazione (▸ ***Fig. 1.68***). Quando viene applicata una tensione fra gli elettrodi, una piccola sorgente di materiale radioattivo emette particelle che ionizzano l'aria permettendo il passaggio di una debole cor-

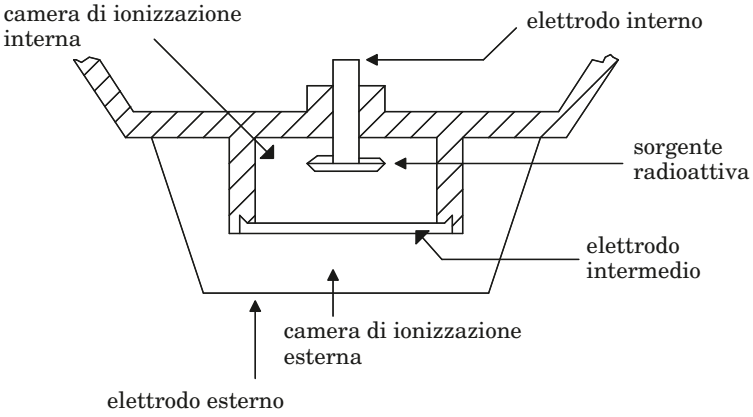


Fig. 1.68
Rivelatore di gas di combustione a doppia camera.

rente. Quando giungono nella camera di ionizzazione, i gas di combustione interferiscono con gli ioni presenti riducendo l'intensità della corrente.

Se il dispositivo è posto in serie a una resistenza di valore elevato è possibile rilevare ed elaborare le variazioni di tensione. Il valore elevato della resistenza fa sì che il circuito possa essere alimentato con una batteria.

I sensori di combustione sono realizzati con materiali semiconduttori drogati di tipo N depositati su un elemento di metallo nobile che funge da elettrodo riscaldante. I gas combustibili presenti nell'aria vengono assorbiti dalla superficie del semiconduttore aumentandone la conduttività fino a 20 volte (anche con basse concentrazioni del drogante). L'elettrodo ha la funzione di mantenere elevata la temperatura del dispositivo al fine di stabilizzare il fenomeno su cui il suo funzionamento si basa.

La variazione della conduttività viene rilevata misurando le variazioni della tensione presente su una resistenza collegata in serie al sensore. Per uno stesso sensore, a parità di resistenza collegata in serie, la tensione massima rilevabile è funzione del tipo di gas (butano, metano, etanolo, idrogeno, monossido di carbonio, ossido di azoto, fumi emessi da solventi organici o fumo di sigaretta ecc.) e della sua concentrazione nell'aria (▸ ***Fig. 1.69***). Il sensore raggiunge il valore massimo di tensione dopo un minuto circa dall'inizio del fenomeno di combustione, ed è in grado di rilevare la presenza di gas su una superficie di 70 m^2.

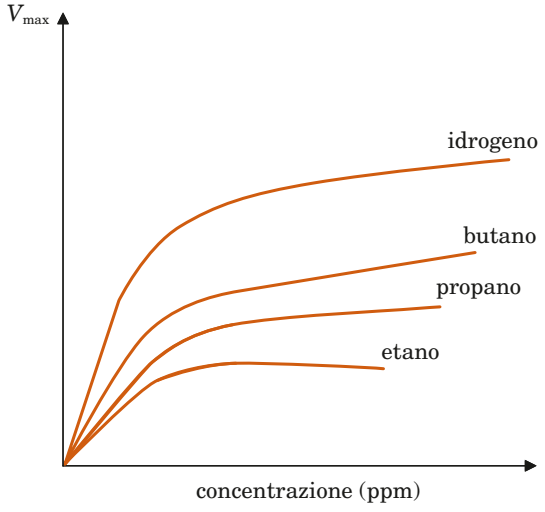
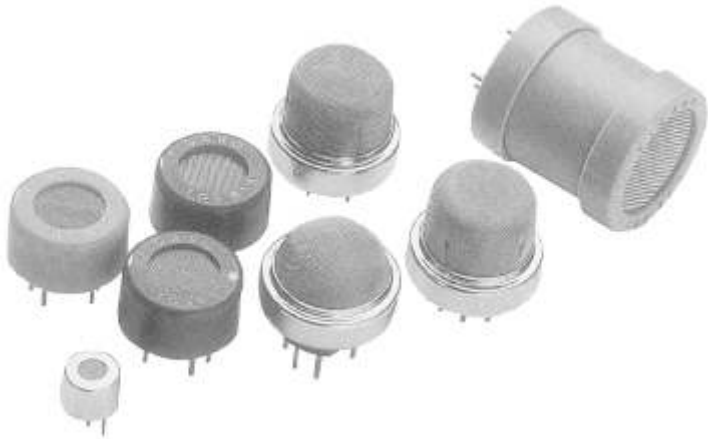


Fig. 1.69
Caratteristica di uscita dei rivelatori di gas in funzione del tipo di gas e della sua concentrazione.

La ***figura 1.70*** mostra alcuni tipi commerciali di rivelatore di gas.

Fig. 1.70
Forme costruttive dei rivelatori di gas.



Rivelatori di fiamma

I rivelatori di fiamma rilevano le radiazioni emesse nella banda dell'infrarosso dalle fiamme.

La banda di radiazione emessa da una fiamma è estremamente ampia e si estende anche in quella visibile. Per evitare che il sensore sia influenzato da una qualsiasi sorgente di calore (solare, radiatori dell'impianto di riscaldamento) viene scelta la banda di rilevamento compresa fra 5 e 30 Hz (caratteristica delle oscillazioni delle fiamme), che esclude tutti i corpi non in movimento.

I circuiti che impiegano questo sensore possiedono sempre un circuito ritardatore (20 ÷ 30 s) che permette al sensore di esaminare il fenomeno a lungo evitando così false commutazioni. I sensori più recenti utilizzano per la rilevazione la banda ultravioletta al di sotto di 0,27 μm, in modo da non sovrapporre alla luce delle fiamme quella dovuta all'energia solare.

11 SENSORI INTELLIGENTI

Negli ultimi anni sono stati sviluppati sensori di nuova generazione noti genericamente come "Smart Sensor" o sensori intelligenti. Essi non si limitano a effettuare l'operazione di trasduttore di una variabile di tipo fisico (chimica o elettrica), ma è parte della catena di acquisizione, elaborazione e trasmissione del segnale.

Un sensore intelligente è composto da cinque blocchi funzionali (▸ ***Fig. 1.71***):

1. il sensore vero e proprio;
2. i circuiti (quasi sempre analogici) di amplificazione e di condizionamento del segnale;
3. il convertitore analogico/digitale;
4. il microcalcolatore e la sua memoria che, in funzione della sua programmazione, provvede a elaborare il segnale acquisito con metodi numerici;
5. l'interfaccia di comunicazione verso l'esterno, che può essere un qualsiasi tipo di collegamento adatto alla trasmissione dei segnali numerici (porta seriale RS-232, radio ecc.).

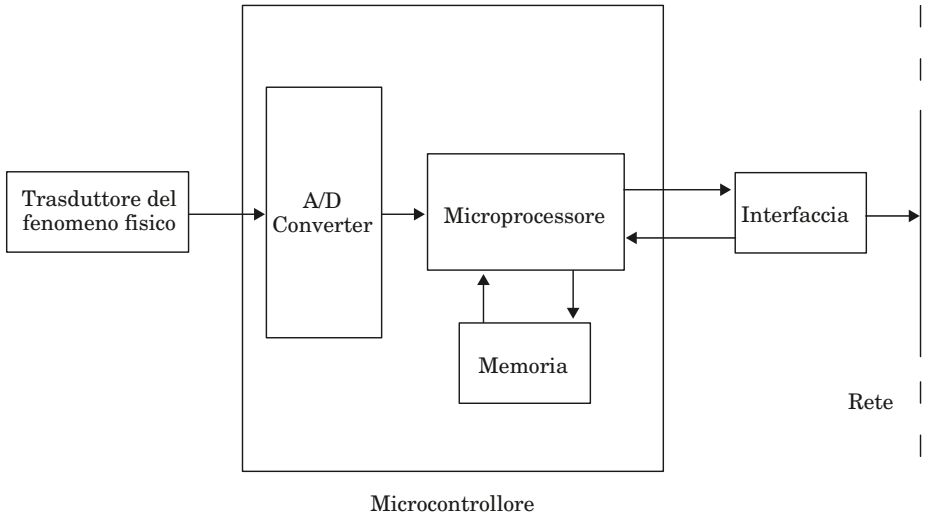


Fig. 1.71
Schema funzionale di un sensore intelligente.

Questi sensori sono stati inizialmente sviluppati per le applicazioni militari e aerospaziali, dove il costo è meno importante rispetto ai benefici ottenuti dall'applicazione di tecnologie più avanzate. Oggi i costi, grazie all'innovazione tecnologica, si sono notevolmente abbassati e questa tipologia di componenti trova diffusione in molte applicazioni industriali e in alcuni prodotti di largo consumo.

I sensori intelligenti non sono più un nodo passivo di una rete di regolazione, ma possono svolgere un ruolo attivo e indipendente o di collaborazione con il sistema di regolazione principale. Essi, infatti, offrono una maggiore affidabilità nella comunicazione delle misure e la possibilità di inserire all'interno del sensore stesso delle funzioni diagnostiche che permettono una migliore manutenibilità dello stesso durante tutta la sua vita operativa.

La comunicazione tra sensore e sistemi di controllo avviene per via digitale, per cui non vi è il rischio di influenzare i risultati della misura e quindi di alterare le reazioni dell'organo di controllo.

Le tecniche di comunicazioni digitali permettono l'inserimento a basso costo di codici di controllo, di algoritmi di ridondanza e di altri accorgimenti che possono eliminare l'incertezza della trasmissione del valore misurato.

Il microcalcolatore inserito nel sensore intelligente può essere programmato per reagire a un uso scorretto del dispositivo, può memorizzare i parametri di calibrazione, può generare messaggi vocali che avvisano il centro di controllo dell'esistenza di un problema.

La sola riduzione dei costi di manutenzione giustifica talvolta l'inserimento nel progetto di questo tipo di sensori. Per esempio, il sistema di supervisione ogniqualvolta richiede un'operazione di manutenzione preventiva o reattiva può interrogare lo stato di funzionamento del sensore senza esigere un'ispezione manuale in loco.

I principali sensori intelligenti sono stati realizzati per misurare temperature, portate, posizioni e pesi.

I sensori di temperatura intelligenti all'infrarosso impiegano le tecnologie di elaborazione digitale per filtrare e normalizzare il segnale dello spettro infrarosso e tradurlo nella scala termometrica adatta realizzando

così un sensore più efficiente. Le celle di carico intelligenti permettono di compensare automaticamente le variazioni di temperatura e di trasmettere il segnale elaborato da lunghe distanze come avviene, per esempio, nei grandi impianti di pesatura.

Per poter facilitare l'installazione e lo scambio dei dati tra sensori intelligenti e sistemi di controllo è stato definito lo standard IEEE 1451.

Lo standard 1451.1 (Network Capable Application Processor Information Model) definisce il modello fisico e logico di un trasduttore intelligente (la sua struttura dati e il suo funzionamento).

Lo standard 1451.2 (Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet Formats) definisce un'interfaccia di comunicazione seriale tra sensore e sistema di controllo esterno in un'architettura punto a punto. Permette al costruttore di realizzare il sensore in modo tale che il sistema di controllo, per configurarsi in modo ottimale, possa accedere automaticamente ai parametri caratteristici del sensore.

Lo standard 1451.3 (Digital Communication and Transducer Electronic Data Sheet Formats for Distributed Multidrop Systems) definisce un'interfaccia che permette la realizzazione di un'architettura punto-multipunto.

Lo standard 1451.4 (Mixed-Mode Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet Formats) è dedicato alla gestione di sensori con uscita analogica, che comunicano i parametri di configurazione con apposite linee digitali e data sheet elettronico.

Lo standard si prefigge lo scopo di semplificare il processo di configurazione da parte del sistema di controllo dei sensori in quanto gli stessi contengono i dati necessari (data sheet in forma elettronica). Il concetto di base è quello utilizzato per le schede *plug and play* (connetti e lavora).

Alcuni sensori per la comunicazione con l'esterno usano il protocollo TCP/IP e, pertanto, una volta connessi alla rete, possono essere configurati via e-mail utilizzando un indirizzo IP sulla rete internet, o intranet standard.

Un'altra possibilità di connettere i sensori intelligenti nel telerilevamento o nel controllo di livello a distanza è data dall'inclusione nel sensore di un modulo radio GSM che permette al modulo di inviare informazioni da qualunque punto del mondo.

Un collegamento a corto raggio può essere invece realizzato utilizzando altre tecnologie radio standard come quelle utilizzate dalle wireless LAN (IEEE 802.11) o quelle dello standard Bluetooth.

12 CIRCUITI PER L'ELABORAZIONE DEI SEGNALI GENERATI DAI TRASDUTTORI

I trasduttori di tipo analogico forniscono in uscita un'informazione elettrica costituita dalla variazione di tensione o di un parametro elettrico (resistenza, capacità, induttanza); attraverso un circuito apposito, questa variazione può essere trasformata in variazione di una grandezza elettrica da rendere compatibile con quella dell'apparato di controllo che utilizza l'informazione. Nella letteratura tecnica, il circuito che esegue questa trasformazione è detto **di condizionamento** (▸ ***Fig. 1.72***).

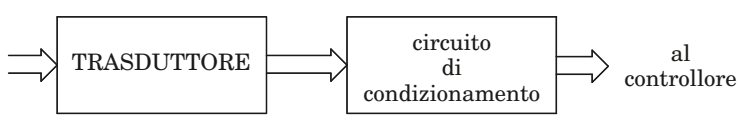


Fig. 1.72
Sistema di acquisizione dati.

Il circuito di condizionamento serve anche a:
— **filtrare il segnale di ingresso** eliminando le componenti di rumore a bassa e ad alta frequenza;
— **amplificare il segnale di ingresso** fino al valore richiesto dall'ingresso del dispositivo che lo utilizza;
— **traslare il livello del segnale** al fine di eliminare l'errore di offset o di linearizzare la caratteristica di uscita del trasduttore.

I segnali provenienti dai sensori subiscono l'effetto di disturbi che devono essere eliminati o attenuati per mantenere un'elevata attendibilità delle misurazioni. È quindi necessario inserire nel circuito di condizionamento dei **filtri** che eliminino dai segnali le frequenze indesiderate, o la presenza di disturbi in specifici intervalli di frequenza.

L'**amplificazione** del segnale rende sfruttabile con più efficacia l'intervallo di conversione tipico dei convertitori *A*/*D*, elevando l'accuratezza e la risoluzione delle misure effettuate. I trasduttori che in genere hanno bisogno di amplificazione sono gli **strain gauge** (estensimetri) e le **termocoppie**.

Alcuni trasduttori, invece, necessitano di attenuare il livello del voltaggio del segnale perché esso non rientra nell'intervallo di valori accettabile dall'apparato di conversione situato a valle. Talvolta il livello è troppo elevato per gli apparati o per gli operatori, e allora il circuito deve anche isolare il trasduttore dal circuito di conversione. L'**isolamento** si rende necessario anche quando il sensore opera a un livello potenziale differente rispetto a quello dei sistemi di misura connessi; può essere ottenuto mediante connessioni non galvaniche come trasformatori, accoppiamenti capacitivi, tecniche di tipo ottico.

Dispositivi come RDT, strain-gauge e accelerometri necessitano anche di circuiti di eccitazione e di linearizzazione. L'**eccitazione del sensore** consiste nel fornire potenza sotto forma di tensione o di corrente, mentre la **linearizzazione** si rende necessaria quando il sensore genera un segnale di uscita che non varia linearmente rispetto alla grandezza misurata.

Un trasduttore che necessita del circuito di linearizzazione è la termocoppia, un trasduttore che richiede anche un circuito che utilizzi la tecnologia CJC di compensazione del giunto freddo, per rilevare la temperatura tra sensore e sistema di acquisizione dati e, in funzione delle sue variazioni, modificare il segnale di uscita.

CJC
– Cold junction compensation

I valori del segnale di uscita generato dai circuiti di condizionamento sono fissati dagli enti di normazione ANSI e DIN nei valori indicati nella ***tabella 1.2***.

Talvolta il trasduttore viene incluso in un'apparecchiatura più complessa detta **trasmettitore**, che traduce un'uscita a basso livello di un trasduttore in un segnale ad alto livello adatto per essere trasmesso a un'apparecchiatura remota in cui viene ulteriormente elaborato.

Tabella 1.2 Valori del segnale di uscita generato dai circuiti di condizionamento (norme ANSI e DIN)

TRASDUTTORI	SEGNALE	CAMPO DI VARIAZIONE*
Elettrici	corrente	0 ÷ 20 mA 4 ÷ 20 mA
	tensione	0 ÷ 5 V 0 ÷ 10 V
Pneumatici	pressione	0 ÷ 5 psi 0 ÷ 15 psi 0 ÷ 30 psi 0 ÷ 100 psi 3 ÷ 15 psi

* **Nota** Campo di variazione più usato.

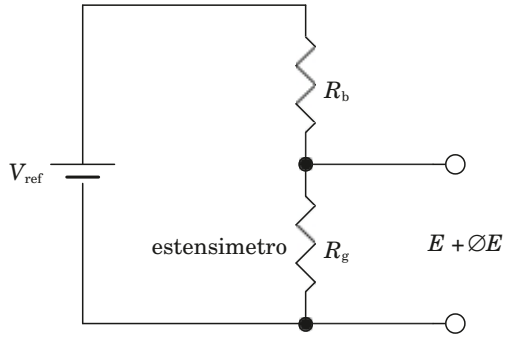
Metodo potenziometrico

Il circuito più semplice impiegato per rivelare la variazione di un parametro elettrico è il potenziometrico (▸ ***Fig. 1.73***).

In questo circuito, il trasduttore (nell'esempio presentato nella figura è un estensimetro con valore resistivo iniziale R_g) è connesso in serie con una tensione di riferimento costante (batteria o tensione stabilizzata) e una resistenza di calibrazione di valore fisso R_b che controlla la corrente nel circuito.

Il segnale di uscita può essere inviato a un amplificatore elettronico direttamente o per mezzo di un **accoppiamento capacitivo**.

Fig. 1.73
Metodo potenziometrico di misura.



L'accoppiamento capacitivo fra il circuito potenziometrico e l'amplificatore elettronico esclude la componente continua statica, ma permette la trasmissione della componente pulsante. Il circuito consente quindi di misurare anche sollecitazioni in regime dinamico. Questa soluzione circuitale presenta però alcuni inconvenienti:

— la variazione della tensione ΔE dev'essere misurata relativamente a valori di tensione E;
— se la variazione di tensione ottenibile rispetto alla tensione di riferimento E è molto piccola, un piccolo errore nella misura di E e di $E + \Delta E$ può produrre errori molto grandi.

Metodo a ponte di Wheatstone

Il metodo a ponte di Wheatstone, inventato da Samuel Hunter Christie e perfezionato dal fisico inglese Charles Wheatstone, è il metodo classico, e più antico (ha più di 100 anni), per la misura delle resistenze elettriche di valore medio, cioè comprese fra 1 e 100.000 Ω.

Il metodo a ponte di Wheatstone permette di azzerare il valore della tensione di uscita da inviare all'amplificatore quando la rete resistiva è bilanciata (▸ ***Fig. 1.74***). La tensione di uscita è data dalla differenza fra le uscite dei due partitori resistivi di tensione alimentati da una sorgente di tensione di **eccitazione del ponte**. Quando, in seguito a una sollecitazione meccanica o termica, un elemento del ponte modifica il suo valore, in uscita si rileva una variazione di tensione che può essere misurata.

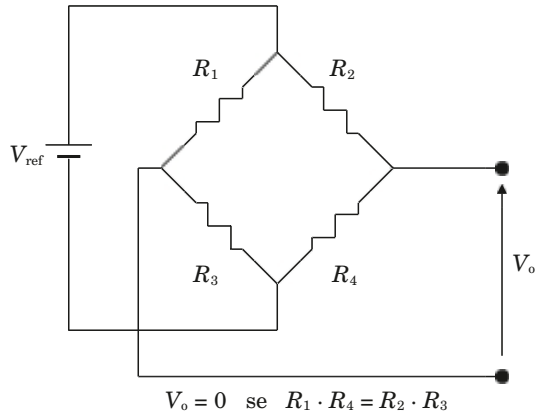


Fig. 1.74
Ponte di Wheatstone: condizione di bilanciamento.

Il collegamento a ponte di Wheatstone permette di eseguire, contemporaneamente, misure sia statiche sia dinamiche, e in molti casi di compensare la deriva termica dei dispositivi di misura.

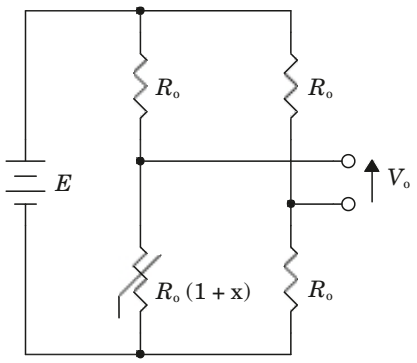
Il circuito della ***figura 1.75a*** contiene un solo trasduttore resistivo che, per effetto della grandezza da misurare (per esempio, un aumento di temperatura), accresce il suo valore resistivo di una frazione x rispetto al valore nominale. La relazione fra la tensione di uscita e il coefficiente x è non lineare, indipendentemente dall'eventuale non linearità propria del trasduttore. Tale errore di linearità può essere trascurato se la variazione x della resistenza è piccola. A parità di tensione di eccitazione, a piccole variazioni della resistenza corrispondono piccole variazioni del segnale di uscita.

Il circuito mostrato nella ***figura 1.75b*** presenta la stessa relazione non lineare fra tensione di uscita e coefficiente x, ma presenta una sensibilità doppia.

Il circuito della ***figura 1.75c*** utilizza un ponte costituito da due coppie di trasduttori fra loro complementari. La sensibilità e la linearità del segnale di uscita sono nettamente migliori. I circuiti a ponte presentano il grosso inconveniente di richiedere, per amplificare il segnale V_o, che non ha un riferimento a massa, un amplificatore differenziale.

Il circuito della ***figura 1.76*** esemplifica un ponte di Wheatstone con un trasduttore linearizzato con l'inserimento di un amplificatore operazionale.

Figg. 1.75a. b. c
Metodo di misura con ponte di Wheatstone:
a. un trasduttore;
b. due trasduttori;
c. quattro trasduttori.

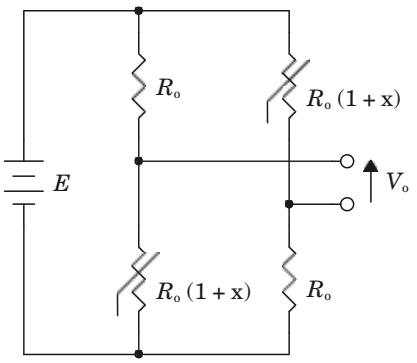


$$V_o = \frac{R_o\,(1+x)}{R_o + R_o\,(1+x)} \cdot E - \frac{1}{2} \cdot E =$$

$$= \frac{E}{4} \cdot \frac{x}{1+\frac{x}{2}}$$

per $x << 1 \quad V \simeq \frac{E}{4} \cdot x$

1.75a

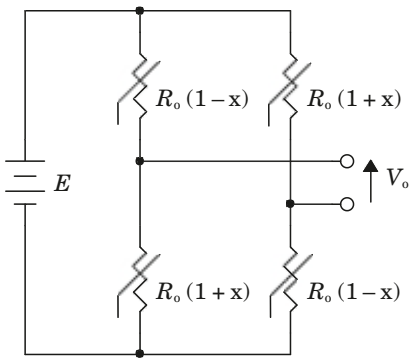


$$V_o = \left| \frac{R_o\,(1+x)}{R_o + R_o\,(1+x)} - \frac{R_o}{R_o + R_o\,(1+x)} \right| \cdot E =$$

$$= \frac{E}{2} \cdot \frac{x}{1+\frac{x}{2}}$$

per $x << 1 \quad V_o \simeq \frac{E}{2} \cdot x$

1.75b

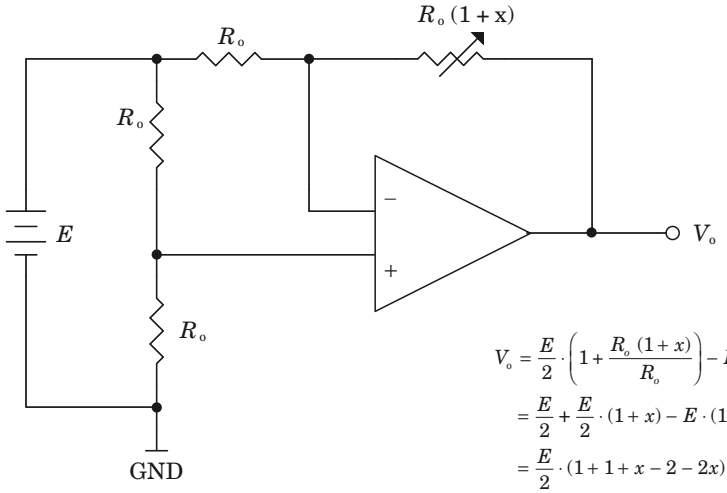


$$V_o = \left| \frac{R_o\,(1+x)}{R_o\,(1+x) + R_o\,(1-x)} - \frac{R_o\,(1-x)}{R_o\,(1+x) + R_o\,(1-x)} \right| \cdot E =$$

$$V_o = \left| \frac{R_o\,(1+x)}{2\,R_o} - \frac{R_o\,(1-x)}{2\,R_o} \right| \cdot E = E \cdot x$$

1.76c

Fig. 1.76
Metodo di misura con ponte di Wheatstone linearizzato con l'inserimento di un operazionale.



$$V_o = \frac{E}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_o\,(1+x)}{R_o}\right) - E \cdot \frac{R_o\,(1+x)}{R_o} =$$

$$= \frac{E}{2} + \frac{E}{2} \cdot (1+x) - E \cdot (1+x) =$$

$$= \frac{E}{2} \cdot (1+1+x-2-2x) = -\frac{E}{2} \cdot x$$

PER FISSARE I CONCETTI

1. Quali misure si possono effettuare con le fibre ottiche?
2. Descrivi il principio di funzionamento di un trasduttore per la rilevazione della presenza di gas.

SINTESI DEL MODULO A

CAPITOLO 1

I **trasduttori** per applicazioni elettroniche trasformano una grandezza fisica (posizione, forza, velocità, pressione, temperatura) in una grandezza fisica elettrica (tensione, corrente) allo scopo di permetterne la misura o il controllo. Vengono impiegati in tutti i settori produttivi e per scegliere quello più adatto a una data applicazione occorre avere una conoscenza completa dei vari tipi dei sensori di ingresso e delle loro principali caratteristiche, tecnologiche ed elettriche.

— Nei sistemi digitali, il segnale in uscita dei trasduttori viene prelevato a intervalli di tempo predefiniti, tali da conservare l'informazione in essi contenuta: secondo il teorema del campionamento, la frequenza dei prelievi dev'essere maggiore del doppio della frequenza massima contenuta nel segnale prodotto dal trasduttore. Per essere utilizzato da sistemi digitali, il segnale deve diventare di tipo discreto anche in ampiezza; l'operazione che permette di effettuare questa trasformazione è detta **quantizzazione** e consiste nell'assegnare un codice numerico binario a un intervallo di valori della grandezza di uscita. Il numero di bit utilizzato per la trasformazione e, quindi, il numero di stati di uscita ottenibili, fornisce un indice della qualità dell'operazione di discretizzazione (**risoluzione**).

— I principali parametri che permettono di valutare le prestazioni di un trasduttore sono: la **funzione di trasferimento**, il **guadagno**, l'**errore di guadagno**, la **linearità**, la **sensibilità**, l'**isteresi**, la **precisione** o **ripetitività**, l'**offset di uscita**, la **risposta in frequenza**, le **caratteristiche dinamiche**.

Per rilevare una posizione o uno spostamento lineare si utilizzano: trasduttori resistivi (**potenziometri**), **trasduttori capacitivi**, **trasduttori induttivi**, **trasformatori differenziali**, **estensimetri**, **sensori di Hall**.

— I **potenziometri resistivi** possiedono un elemento resistivo su cui scorre un contatto (**cursore**) mobile. Sono trasduttori passivi, e quindi richiedono l'uso di una sorgente ausiliaria di alimentazione che, in funzione del tipo di elaborazione da effettuare sul segnale in uscita, può essere a tensione continua o alternata. I potenziometri non vengono utilizzati spesso come trasduttori per servomeccanismi di macchine utensili perché le possibili alterazioni sul contatto strisciante, provocate da eventuali vibrazioni della macchina e dal pulviscolo esistente nell'ambiente, impregnato di particelle metalliche, li rendono poco affidabili.

— I **trasduttori capacitivi** sono di tipo passivo e sono formati da condensatori. La capacità di un condensatore piano dipende dalla superficie delle due armature e dalla costante dielettrica del materiale isolante (**dielettrico**) interposto fra di esse; è inversamente proporzionale alla loro distanza.

— I **trasduttori induttivi** effettuano la trasformazione della grandezza fisica in elettrica nello stesso modo dei trasduttori capacitivi. Il principale vantaggio offerto dal potenziometro induttivo è la sua maggiore precisione: fra spira e spira è presente sempre lo stesso valore di tensione e quindi, anche se le prese sulle spire non sono posizionate esattamente, la tensione prelevata non è affetta da errori.

— Un trasduttore molto impiegato è il **trasformatore differenziale di tensione**. È formato da un avvolgimento primario connesso con una sorgente di tensione a corrente alternata (da 3 a 15 V con frequenza da 50 a 20 kHz) e da due avvolgimenti secondari interconnessi in modo tale che le tensioni indotte dal primario si bilanciano perfettamente, con la conseguenza che la corrente circolante è nulla.

— Gli **estensimetri** o **sensori di sforzo** (*strain gauges*) servono per misurare le deformazioni che si manifestano sulla superficie di un corpo per effetto di una qualsiasi causa fisica (forza, pressione, urti, vibrazioni). La misura della deformazione viene fatta convertendo la variazione dimensionale dell'oggetto in variazione di resistenza.

— La **cella di carico** utilizza gli estensimetri per eseguire misure di forza, pesature e dosaggi elettronici. La misura della forza applicata al provino viene effettuata valutando la deformazione di un supporto elastico, applicato alla struttura in prova, sul quale sono stati montati uno o più estensimetri.

— I **trasduttori di posizione angolare** (*encoders*) sono apparati elettromeccanici che convertono la posizione angolare dell'asse rotante in un segnale elettrico digitale. Collegato a opportuni circuiti elettronici con apposite connessioni meccaniche, l'encoder è in grado di misurare spostamenti angolari, movimenti rettilinei e circolari, nonché velocità di rotazione o accelerazioni. I trasduttori di posizione angolare digitali più utilizzati sfruttano la tecnica fotoelettrica e possono essere **di tipo incrementale** o **di tipo assoluto**.

— I **trasduttori di posizione angolare di tipo incrementale** sono costituiti da un disco trasparente sul cui bordo sono stati ricavati dei settori opachi ugualmente distanziati, e da un rilevatore ottico (per esempio una forcella ottica) che rileva il diverso comportamento ottico della superficie del disco. La **risoluzione angolare** è data dal rapporto fra l'angolo giro (360°) e il numero di settori presenti sul disco codificato.

— I **trasduttori di posizione angolare di tipo assoluto** sono costituiti da un disco di materiale trasparente e da un gruppo di rivelatori ottici. Il disco viene suddiviso in vari settori identici ciascuno dei quali viene a sua volta suddiviso in tracce di uguale spessore che possono essere trasparenti (0) oppure opache (1). Le tracce di un settore, lette contemporaneamente, forniscono un valore binario.

— I codici utilizzati sono il **binario**, il **BCD** (fino a sei decadi) e il **codice Gray** (fino a 24 bit). Il disco che utilizza il codice Gray ha la caratteristica di essere progressivo: prevede che fra un numero e il successivo ci sia sempre il salto di un solo bit. Un altro vantaggio del codice Gray è che la pista relativa alla traccia di peso minore ha un numero di interruzioni pari alla metà di quelle corrispondenti di un numero binario.

I **trasduttori di velocità e di accelerazione**, o **accelerometri**, sono utilizzati per misurare accelerazioni. Sono costituiti da una massa montata su una o più molle vincolate in modo da potersi muovere in una sola direzione. Quando la massa subisce accelerazioni nella direzione consentita dal vincolo, lo spostamento è proporzionale all'accelerazione. Questa informazione può essere utilizzata per effettuare misure di forza e di pressione.

— La **dinamo tachimetrica** è una macchina elettrica rotante che viene montata coassialmente all'albero del motore di cui si desidera rilevare la velocità di rotazione. La parte fissa genera un campo magnetico uniforme in cui si muove la parte mobile (**indotto**). La tensione in uscita, che può essere positiva o negativa in funzione del senso di rotazione, è proporzionale alla velocità di rotazione angolare dell'indotto.

I **sensori di prossimità** rilevano la presenza di un oggetto in movimento rispetto al sensore. Il sensore più classico è il **finecorsa**: manovrato dal corpo dell'oggetto da rilevare, muovendosi agisce sull'organo mobile modificandone la posizione e provocando la chiusura o l'apertura dei contatti. Questo tipo di sensore risente fortemente delle condizioni meccaniche, presenta problemi di installazione negli ambienti a rischio esplosivo (polverosi o saturi di gas) ed è sensibile alle condizioni ambientali (temperatura, umidità).

— I **sensori di Hall** a semiconduttore presentano una maggiore sensibilità rispetto a quelli metallici in quanto l'effetto Hall aumenta al diminuire della concentrazione di portatori mobili, che è più bassa nei semiconduttori che nei metalli. I materiali semiconduttori utilizzati per costruire i sensori di Hall sono l'arseniuro di indio oppure di gallio. Quest'ultimo materiale si è rivelato molto efficace perché, utilizzando transistor MESFET, permette di costruire sensori a circuito integrato molto compatti e affidabili, ricavati sullo stesso substrato.

I **trasduttori di pressione** possono essere realizzati utilizzando un ponte di resistenze diffuso su di una membrana; l'elemento sensibile può essere un estensimetro oppure una piastrina di silicio piezoresistiva. La forma e le dimensioni del contenitore dei trasduttori di pressione sono molto varie, mentre i materiali impiegati sono scelti tenendo conto delle condizioni ambientali di impiego. Sono utilizzati in applicazioni biomediche e negli impianti chimici e di processo.

I **trasduttori di temperatura** trasformano una variazione di temperatura in variazione di un parametro elettrico. Il loro campo di applicazione può essere di tipo industriale, civile e biomedico. I più utilizzati sono: **sensori bimetallici**, **termistori**, **RTD**, **sensori a circuiti integrati**, **termocoppie**.

I **trasduttori di livello** sono impiegati in tutti i processi industriali per effettuare la misura del livello di riempimento di un certo contenitore (vasca, serbatoio). Possono essere di vari tipi: **capacitivo**, **idrostatico**, **elettromeccanico**, **ecoscandaglio**, **vibrazione**, **conduttivo**, **radioattivo**, **microonde**, **laser**.

I **flussometri a pressione differenziale** vengono inseriti nel circuito idraulico in modo che il flusso del liquido lo percorra: con opportuni trasduttori o strumenti si valuta poi la differenza di pressione fra l'ingresso e l'uscita. Sono formati da due elementi: un primario e un secondario.

— Le **flange tarate**, che costituiscono il tipo di flussometro più diffuso, sono formate da una piastra di metallo con un foro appositamente dimensionato, che può essere concentrico o eccentrico rispetto al flusso, di forma circolare, conica o quadrata. Il principale vantaggio delle flange tarate consiste nell'assenza di organi in movimento e nel costo, che è sostanzialmente indipendente dalle dimensioni del tubo su cui si esegue la misura. Questo tipo di flussometro viene utilizzato con liquidi che presentano **numeri di Reynolds** bassi.

I **sensori a fibre ottiche** (SFO) vengono classificati, in funzione del tipo di fibra utilizzata, in monomodo e multimodo. Il **sensore a fibra ottica monomodo** sfrutta la tecnica interferometrica mediante due fibre montate in **configurazione Mach-Zender**. I **sensori a fibra ottica multimodo** possono essere suddivisi in: SFO elettro-ottico, SFO con trasduttore ottico discreto, SFO propriamente detto.

I **sensori sensibili al fumo** più semplici sono costituiti da una camera in cui è posta una sorgente luminosa e un ricevente (fotodiodo, fototransistor); in presenza di fumo, l'intensità luminosa che incide sul ricevitore varia modificando il suo stato di conduzione. Questi sensori non discriminano la sorgente del fumo (vapore acqueo, fumo di sigaretta, fumo da combustione, fuga di metano o di altri gas). I **sensori di combustione** sono realizzati con materiali semiconduttori drogati di tipo N depositati su un elemento di metallo nobile che funge da elettrodo riscaldante. I gas combustibili presenti nell'aria vengono assorbiti dalla superficie del semiconduttore aumentandone la conduttività fino a 20 volte (anche con basse concentrazioni del drogante).

I **trasduttori di tipo analogico** forniscono in uscita un'informazione elettrica costituita dalla variazione di tensione o di un parametro elettrico (resistenza, capacità, induttanza); attraverso un circuito apposito, questa variazione può essere trasformata in variazione di una grandezza elettrica da rendere compatibile con quella dell'apparato di controllo che utilizza l'informazione. Nella letteratura tecnica, il circuito che esegue questa trasformazione è detto **di condizionamento**.

— Il circuito più semplice impiegato per rivelare la variazione di un parametro elettrico è il **potenziometrico**: il trasduttore è connesso in serie con una tensione di riferimento costante (batteria o tensione stabilizzata) e una resistenza di calibrazione di valore fisso R_b che controlla la corrente nel circuito. L'accoppiamento capacitivo fra il circuito potenziometrico e l'amplificatore elettronico esclude la componente continua statica, ma permette la trasmissione della componente pulsante. Il circuito consente quindi di misurare anche sollecitazioni in regime dinamico.

— Il **collegamento a ponte di Wheatstone** permette di azzerare il valore della tensione di uscita da inviare all'amplificatore quando la rete resistiva è bilanciata. Permette di eseguire, contemporaneamente, misure sia statiche sia dinamiche, e in molti casi di compensare la deriva termica dei dispositivi di misura.

VERIFICHE

1.
Quali sono le principali grandezze fisiche che possono essere convertite da un trasduttore? In quali grandezze elettriche vengono convertite?

2.
Definisci l'errore di linearità per un trasduttore ed elaborane un'indicazione grafica.

3.
Si deve controllare la velocità di rotazione del mandrino di una fresa. Scegli il trasduttore più adatto alla misura della velocità fra: un encoder ottico incrementale, un potenziometro rotativo in plastica conduttiva e una dinamo tachimetrica, indicando le motivazioni della tua scelta.

4.
Si deve attivare l'air bag di un'autovettura in caso di urto frontale. Scegli il trasduttore da impiegare tra un estensimetro, un trasformatore differenziale LVDT e un accelerometro piezoelettrico, motivando la tua scelta.

5.
Definisci l'errore di guadagno di un trasduttore e valuta se tale errore è possibile in un potenziometro resistivo. In caso affermativo indicane la causa.

6.
Quale parametro meccanico di una dinamo tachimetrica è rilevante nel caso sia collegata a un motore elettrico di piccole dimensioni ed elevate prestazioni dinamiche?

7.
Si deve controllare il posizionamento del vetrino portacampioni posto sotto un microscopio ottico. La corsa è di 25 mm e la risoluzione richiesta è di 0,1 µm. Scegli il trasduttore più adatto tra una riga ottica (encoder incrementale lineare), un trasformatore lineare differenziale e un potenziometro resistivo lineare; motiva la tua scelta.

8.
Che tipo di circuito viene impiegato per l'amplificazione del segnale generato da un trasduttore estensiometrico?

9.
Definisci l'effetto Hall e descrivi alcune delle sue applicazioni (almeno quattro).

10.
Definisci l'isteresi di un trasduttore.

MODULO B

Dispositivi elettronici di potenza

CAP 2
CAP 3

TRANSISTOR BIPOLARE E MOS IN COMMUTAZIONE
TIRISTORI

Prerequisiti

- Leggi fondamentali dell'elettromagnetismo.
- Meccanismi di conduzione elettrica nei materiali semiconduttori e di funzionamento.
- Principio di funzionamento dei transistor bipolari, JFET e MOSFET.
- Dimensionamento di un dissipatore di calore.

Obiettivi

Conoscenze

- Principio di funzionamento dei principali dispositivi semiconduttori di potenza.
- Soluzione delle problematiche relative alla commutazione dei dispositivi di potenza.
- Tecnologia di fabbricazione dei dispositivi di potenza.

Competenze

- Saper progettare e dimensionare circuiti che impiegano dispositivi di potenza.

TRANSISTOR BIPOLARE E MOS IN COMMUTAZIONE

Concetti chiave

- Circuito di bootstrap
- Figura di merito
- Rendimento
- Zona di interdizione
- Zona di saturazione
- Zona lineare

1 Transistor bipolare in commutazione
2 Transistor MOS in commutazione

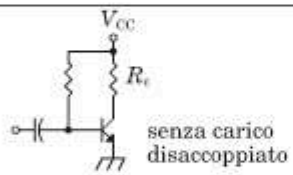
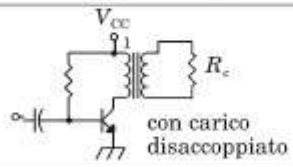
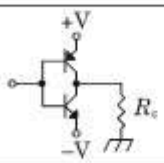
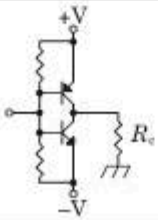
La maggior parte delle apparecchiature elettroniche può essere suddivisa, dal punto di vista funzionale, in due sezioni: una di controllo che, dopo aver ricevuto i segnali di ingresso, elabora e invia i comandi, e una di potenza che controlla il trasferimento di potenza dal generatore al carico.

La **sezione di controllo** è costituita da componenti che richiedono correnti e tensioni di basso valore (di solito inferiori, rispettivamente, a 1 A e a 24 V) e che hanno un consumo di potenza basso (inferiore a 1 W).

I circuiti di potenza si suddividono in due classi: gli amplificatori; i regolatori di potenza.

Gli **amplificatori di potenza** hanno lo scopo di fornire al carico un segnale avente la stessa forma di quello in ingresso (non distorta) ma di potenza maggiore. Un amplificatore di potenza viene valutato in base al **rendimento** η (dato dal rapporto fra la potenza utile assorbita dal carico P_u e la potenza erogata dall'alimentazione P_a) e alla **figura di merito** F (data dal rapporto fra la massima potenza assorbita dall'elemento attivo di regolazione, transistor bipolare o MOS, amplificatore operazionale di potenza, e la potenza utilizzata dal carico P_u). Sono classificati in cinque gruppi: A, B, AB, C, D. Ciascun gruppo presenta vantaggi e svantaggi, differenti valori di rendimento e di figure di merito, e riproduce più o meno fedelmente la forma d'onda d'ingresso (▸ ***Fig. 2.1***).

Fig. 2.1
Classificazione degli amplificatori di potenza.

CONFIGURAZIONE CIRCUITALE	CLASSE	RENDIMENTO DI CONVERSIONE	FIGURA DI MERITO	NOTE
 senza carico disaccoppiato	A	$\eta = \frac{P_u}{P_a}$ 0,25	$F = \frac{P_{lgc}}{P_u}$ 2	Il carico è percorso da corrente continua
 con carico disaccoppiato	A	0,5	2	Il trasformatore è un componente costoso e ingombrante
	B	0,78	0,28	Necessita di una tensione di alimentazione duale Presenta una distorsione del segnale detta di *crossover*
	AB	0,78	0,28	Necessita di una tensione di alimentazione duale Non presenta una distorsione del segnale detta di *crossover*

Il primo circuito della ***figura 2.2a*** mostra un sistema di regolazione molto semplice basato su un reostato. La potenza erogata dal generatore viene trasferita in parte al carico e in parte sul reostato di regolazione. Il rendimento del trasferimento di potenza, dato dal rapporto tra potenza utile e potenza erogata, dipende dal valore resistivo del reostato; se i due valori resistivi sono identici il rendimento è solo del 50%.

I due circuiti della ***figura 2.2b*** sostituiscono il reostato con il contatto di un relè con in parallelo un diodo. Quando il contatto del relè è aperto, il diodo conduce solo per la semionda positiva e sul carico giunge solo metà della potenza erogata; quando il contatto è chiuso, il diodo viene cortocircuitato e tutta la potenza erogata dal generatore è trasferita al carico. Questo tipo di controllo, sostituendo il contatto del relè con un interruttore, è utilizzato nei piccoli elettrodomestici, per esempio per ottenere due livelli di riscaldamento nelle bistecchiere o due velocità di erogazione del flusso d'aria negli asciugacapelli.

Nel circuito della ***figura 2.2c***, la chiusura e l'apertura del contatto del relè sono controllate in modo tale da far pervenire al carico solo una frazione della tensione di rete, parzializzando la forma d'onda e controllando l'istante di inizio della conduzione. Questo circuito viene realizzato utilizzando tiristori quali Triac, SCR e GTO.

Il controllo del trasferimento di potenza mediante il controllo dell'angolo di conduzione è utilizzato anche in corrente continua; questa tecnica è

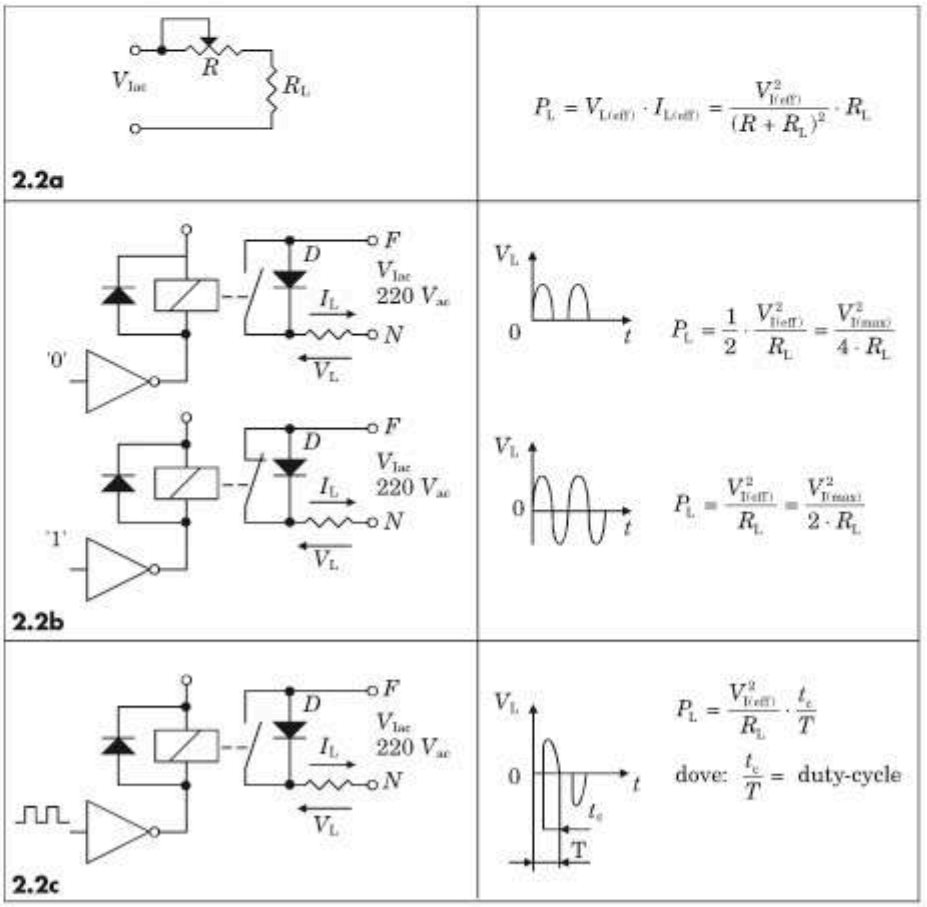
Figg. 2.2a, b, c

Circuiti di regolazione on-off:

a. con reostato;

b. con diodo;

c. a parzializzazione di fase.



PWM
– Pulse-width modulation

detta **PWM** e si basa sul controllo del duty-cycle dell'onda quadra; la frequenza dell'onda dev'essere tale da non provocare discontinuità nel trasferimento di potenza, come avviene intervallando periodi di conduzione e di non conduzione così lunghi da generare, in un motore, accelerazioni e decelerazioni vistose che possono danneggiarlo (*pendolamento*) oppure, in una lampada, la comparsa di un fastidioso sfarfallio. La frequenza non può comunque assumere valori elevati a causa delle inerzie meccaniche dei motori e delle inerzie termiche delle lampade. La regolazione PWM è ampiamente discussa in seguito (▸ ***Mod. D, Cap. 7***), dove descriviamo le tecniche di controllo della velocità dei motori in corrente continua.

SCR
– Silicon-controlled rectifier

I **regolatori di potenza in corrente continua** utilizzano come elemento attivo i tiristori **(SCR)** e i transistor bipolari e MOS di potenza.

1 TRANSISTOR BIPOLARE IN COMMUTAZIONE

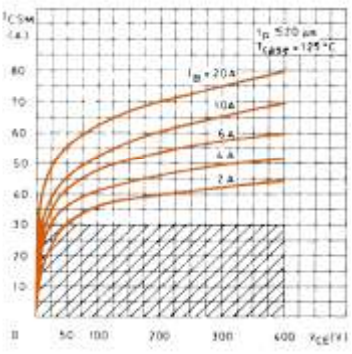


Fig. 2.3
Caratteristica di uscita di un transistor bipolare di potenza (*fonte*: Philips).

Il transistor bipolare può operare in tre zone diverse (▸ ***Fig. 2.3***):

1. in **zona di interdizione**, corrente pressoché nulla e caduta di tensione elevata;
2. in **zona lineare**, a uguali variazioni di tensione si hanno uguali variazioni di corrente;
3. in **zona di saturazione**, corrente elevata e caduta di tensione bassa.

Quando viene utilizzato come elemento di commutazione, il transistor commuta fra uno stato scelto nella zona di interdizione (**circuito aperto**) e uno stato scelto nella zona di saturazione (**circuito chiuso**).

Le ***figure 2.4a***, ***b***, ***c*** mostrano un circuito a emettitore comune basato su un transistor NPN. Il transistor si trova nello stato di interdizione (▸ ***Fig. 2.4b***) quando le giunzioni base-emettitore e base-collettore sono polarizzate inversamente; circola solo una debolissima corrente di perdita, la tensione collettore-emettitore è pari alla tensione di alimentazione ($V_{CE} = V_{CC}$) e il transistor si comporta come un circuito aperto. Tale condizione viene ottenuta applicando in base una tensione $V_{BB} \leq 0$.

Quando la tensione V_{BB} aumenta, la giunzione base-emettitore si polarizza direttamente ed entra in conduzione, facendo circolare una corrente di base (I_B) che, amplificata del guadagno in corrente (h_{FE}) del transistor, fa aumentare la corrente di collettore (I_C) e diminuire la caduta di tensione collettore-emettitore (V_{CE}). Per valori di corrente di collettore sufficientemente elevati, la caduta di tensione V_{CE} diventa minima e il circuito si comporta come un interruttore chiuso. In tali condizioni il transistor è saturo ed entrambe le giunzioni sono polarizzate direttamente ($V_{CE(sat)} < V_{BE(sat)}$).

Figg. 2.4a, b, c
Circuito di commutazione di un transistor bipolare di potenza con carico resistivo:

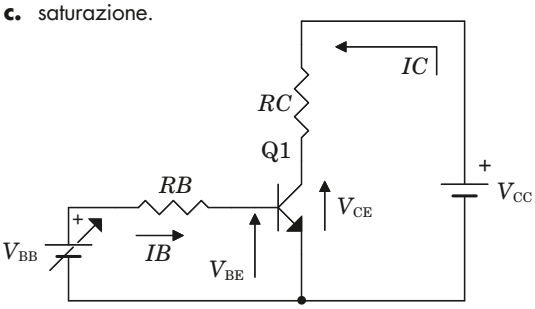
a. $V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C$

$I_C = h_{FE} \cdot I_B$

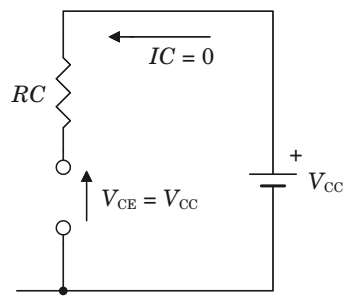
$I_B = \dfrac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$

b. interdizione;

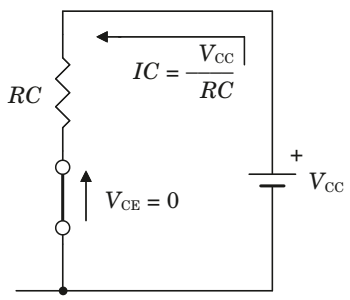
c. saturazione.



2.4a



2.4b



2.4c

Nella ***tabella 2.1*** sono mostrate le condizioni limite a cui opera il transistor in zona di saturazione e in zona di interdizione.

Tabella 2.1 Condizioni limite di funzionamento del transistor

STATO	INGRESSO	USCITA
Interdizione	$\lvert V_{BE}\rvert < BV_{BEO}$	$V_{CC} < BV_{CEO}$
Saturazione	$I_{B\,sat} < I_{B\,max}$	$I_C < I_{C\,max}$ $I_{C\,sat} \cdot V_{CE\,sat} < P_{D\,max}$

ESEMPIO 1

SEQUENZA DI DIMENSIONAMENTO DI UN TRANSISTOR BIPOLARE

La ***figura 2.5*** presenta la sequenza di progetto da seguire per dimensionare correttamente un transistor bipolare che opera in commutazione su un carico resistivo, quando sono note le caratteristiche elettriche del segnale di comando e del carico resistivo da pilotare.

Dati: V_I; I_{Imax}; R_C

Sono noti i parametri del transistor Q1:
V_{BEsat}; V_{CEsat}; h_{FEmin}; I_{Cmax}; BV_{CEO}; BV_{BEO}; P_{Dmax}

Determinare R_B.

1) Equazione della maglia di uscita:

$$I_{Csat} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_C}$$

2) Per garantire la condizione di saturazione del transistor

$$I_B > \frac{I_{Csat}}{h_{FE\,min}}$$

3) Calcolo di R_B:

$$\frac{V_I - V_{BEsat}}{I_B} < R_B < \frac{V_I - V_{BEsat}}{I_{Im\,ax}}$$

garantisce la saturazione — garantisce che non sia superata la massima corrente di ingresso

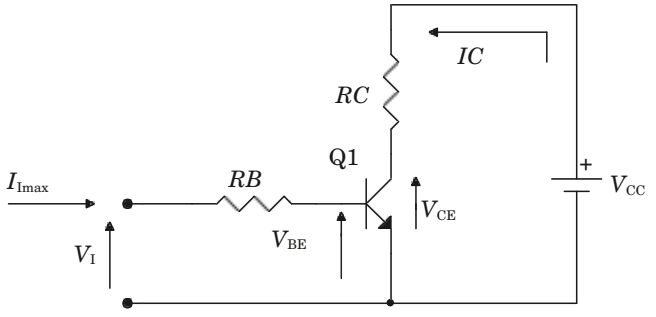


Fig. 2.5
Circuito di commutazione di un transistor bipolare di potenza con carico resistivo: calcoli di dimensionamento.

4) Calcolo della potenza dissipata dal transistor Q1:

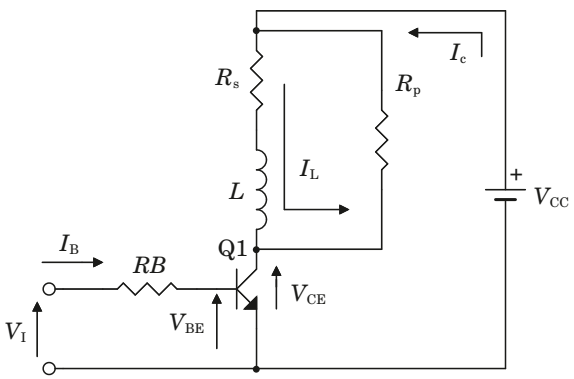
$$P_D = V_{CEsat} \cdot I_{Csat} < P_{Dmax}$$

5) Verifica del rispetto delle condizioni limite.

6) Normalizzazione del valore di R_B al valore commerciale più prossimo.

Transistor bipolare che commuta un carico induttivo

La ***figura 2.6*** mostra il circuito di commutazione basato su un transistor bipolare NPN connesso nella configurazione a emettitore comune che pilota un carico induttivo. Viene messa in evidenza l'induttanza L e la resistenza serie dell'induttore R_s.



R_S resistenza serie
L induttanza dell'avvolgimento
R_p resistenza di smorzamento

A regime:

$$I_{Csat} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_s \,//\, R_p}$$

Fig. 2.6
Circuito di commutazione di un transistor bipolare di potenza con carico induttivo.

Quando il transistor si interdice, la corrente di saturazione che percorre l'induttanza non si annulla istantaneamente e non può circolare nel transistor stesso, per cui ricircola nella resistenza di smorzamento R_P provocando una caduta di tensione che innalza la tensione V_{CE} sul transistor a $V_{CE} + R_P \cdot I_{C(sat)}$. Poi, via via che l'induttanza si scarica, la corrente diminuisce in modo esponenziale con costante di tempo $\tau = L/(R_s + R_P)$; la tensione V_{CE} diminuisce con lo stesso andamento (◗ ***Fig. 2.7***). Se il tempo di interdizione è sufficiente, l'induttanza si scaricherà completamente.

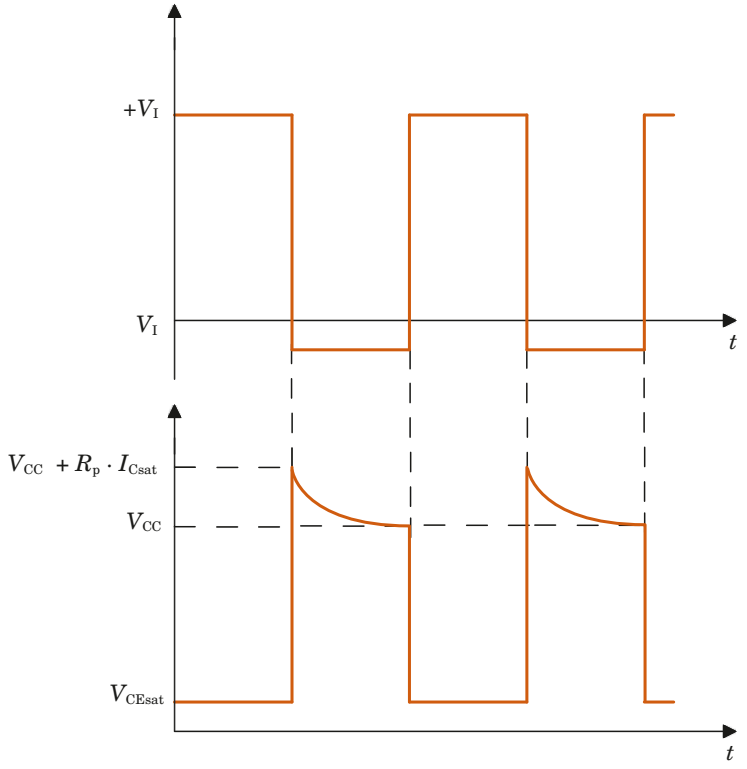


Fig. 2.7
Forme d'onda di commutazione misurate su un transistor bipolare che pilota un carico induttivo.

L'energia accumulata dalla bobina:

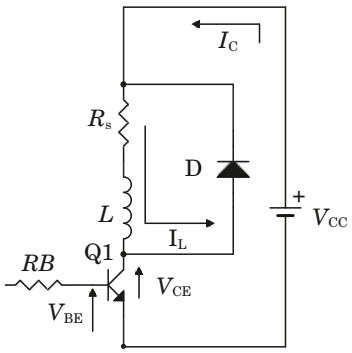
$$E = \frac{1}{2} L \cdot I^2_{C(sat)} \qquad \textbf{2.1}$$

è indipendente dalla resistenza di smorzamento per cui, se la si aumenta, si può ridurre la durata del picco di tensione, ma contemporaneamente si ha un aumento dell'ampiezza. Affinché il transistor non si danneggi è necessario rispettare la seguente limitazione:

$$V_{CC} + R_P \cdot I_{C(sat)} < BV_{CE0} \qquad \textbf{2.2}$$

Nelle realizzazioni pratiche la resistenza di smorzamento viene sostituita da un diodo (▸ ***Fig. 2.8***). Quando il transistor è saturo il diodo non conduce in quanto l'anodo si trova alla tensione $V_{CE(sat)}$ mentre il catodo è a V_{CC}.

Fig. 2.8
Utilizzo del diodo di ricircolo per l'abbattimento dell'impulso generato dall'induttanza.



Durante la commutazione del transistor dallo stato di saturazione a quello di interdizione, il diodo entra in conduzione quando l'induttanza rende positivo l'anodo rispetto al catodo. Il diodo in conduzione presenta una resistenza diretta estremamente bassa, per cui la tensione collettore-emettitore si porta a una tensione $V_{CC} + V_D$ eliminando larga parte delle problematiche esposte in precedenza. È necessario valutare, oltre a quelli statici, anche i parametri dinamici del transistor prescelto, cioè i tempi di commutazione (▸ ***Vol. 2, Mod. B, Cap. 3***).

In saturazione la dissipazione di potenza è minima ($P_D = V_{CE(sat)} \cdot I_{C(sat)}$) in quanto la $I_{C(sat)}$ è elevata ma la tensione è minima. Anche in interdizione la potenza dissipata P_D è minima:

$$P_D = (V_{CC} - R \cdot I_{CBO}) \cdot I_{CBO} \qquad \textbf{2.3}$$

dove:

I_{CBO} è la corrente di fuga inversa, che vale di solito circa 100 μA

Il passaggio dallo stato di conduzione a quello di saturazione non è istantaneo (i fronti di salita e di discesa non sono nulli). Durante la commutazione il transistor dovrà dissipare una notevole potenza per intervalli di tempo finito a causa di valori di corrente e di tensione significativi.

Nel dimensionamento del transistor occorre tenere conto anche degli aspetti termici, valutando la tensione raggiunta dalle giunzioni, che non deve superare il valore massimo ammesso. Se questo avviene si possono fare due scelte progettuali:

— si può facilitare lo smaltimento del calore e ridurre la resistenza termica giunzione-ambiente del transistor (R_{thja}) montandolo su un dissipatore di calore;
— si può scegliere un altro transistor di potenza con un valore di resistenza termica giunzione-ambiente adatto.

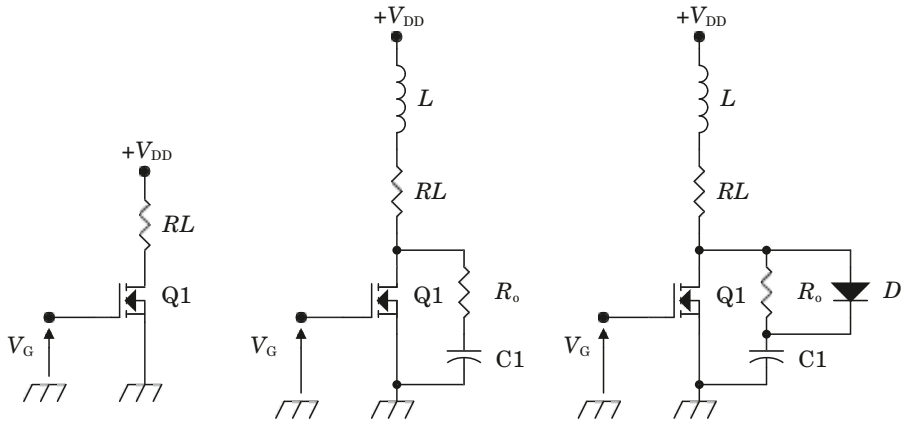
I metodi e i calcoli di dimensionamento dei dissipatori di potenza sono stati discussi nel ***Volume 1, Modd. C*** e ***D, Capp. 8*** e ***10***, scaricabili dal sito Internet.

Per essere utilizzato come elemento attivo di un regolatore on-off, un transistor di potenza deve possedere una bassa tensione collettore-emettitore di saturazione ($V_{CE(sat)}$), un'alta velocità di commutazione e un guadagno di corrente elevato (h_{FE}).

2 TRANSISTOR MOS IN COMMUTAZIONE

L'elemento attivo del regolatore può essere realizzato anche con transistor MOS di potenza. Le ***figure 2.9a, b*** mostrano un circuito di commutazione che si avvale di un transistor NMOS a riempimento (*enhancement*). Quando la tensione applicata al gate è nulla ($V_g = 0$) il canale non esiste, non vi è corrente, il circuito si comporta dal punto di vista elettrico come un condensatore (C_{off}) e i terminali di drain e source sono isolati l'uno dall'altro, separati da un dielettrico.

Figg. 2.9a, b
Circuito di commutazione di un transistor NMOS di potenza:
a. con carico resistivo;
b. con carico induttivo.



2.9a **2.9b**

Quando la tensione applicata al gate supera la tensione di soglia si ha la formazione del canale e il transistor si comporta come un interruttore chiuso con resistenza pari a $R_{DS(ON)}$. Questa resistenza fa sì che la tensione fra drain e source sia proporzionale alla corrente che vi scorre: è quindi necessario utilizzare transistor con bassi valori di resistenza $R_{DS(ON)}$.

$t_{d(on)}$
– Turn-on delay time
$t_{d(off)}$
– Turn-off delay time

La commutazione del transistor, come nei bipolari, avviene in tempi finiti: $t_{d(on)}$ misura il tempo necessario per creare il canale conduttivo; $t_{d(off)}$ misura il tempo necessario per svuotare il canale conduttivo. I tempi di commutazione del transistor NMOS devono essere i più bassi possibile.

Quando è impiegato per commutare carichi induttivi, il transistor MOS subisce un degrado del comportamento e dell'affidabilità a causa dell'aumento della dissipazione di potenza e della corrispondente crescita della temperatura di giunzione. Quest'ultima fa aumentare il valore della resistenza di conduzione $R_{DS(ON)}$ e quindi anche quello della dissipazione, causando la riduzione del tempo di vita utile del transistor MOSFET. Un metodo per ridurre il fenomeno (◗ ***Fig. 2.9b***) consiste nell'aggiungere una rete RC che riduce le perdite di commutazione all'interdizione.

Quando il carico è collegato verso massa, come nel circuito della ***figura 2.10***, e il transistor è chiuso (in conduzione piena), il terminale di source e quello del carico hanno lo stesso potenziale dell'alimentazione. La tensione positiva sul gate rispetto al source, che è derivata dalla tensione di alimentazione, tende ad assumere valori talmente bassi da riaprire il transistor MOSFET; in questa situazione, per mantenerlo in conduzione occorre una tensione di gate più elevata di quella di alimentazione, e que-

sto può essere ottenuto con il cosiddetto **circuito di bootstrap**, costituito da un diodo e da un condensatore.

Quando il circuito di comando è chiuso verso massa, il MOSFET è interdetto e il condensatore è carico al potenziale di alimentazione; quando il circuito di comando si apre verso massa, il MOSFET entra in conduzione, il potenziale di source aumenta e il condensatore agisce come un generatore di tensione in serie con il source conservando una tensione sufficiente per mantenere il MOSFET in conduzione. Ciò è reso possibile dal fatto che il gate non assorbe corrente a regime, ma il condensatore un poco alla volta si scarica comunque; il tempo utile di conduzione ottenibile è dell'ordine di qualche secondo.

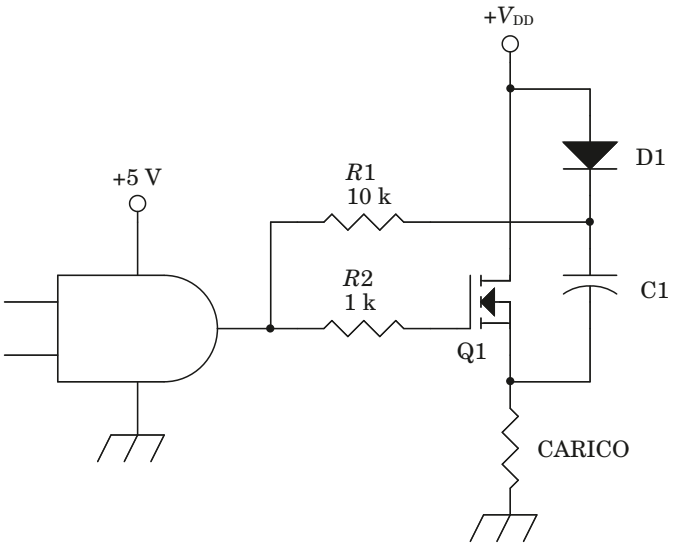


Fig. 2.10
Il transistor MOSFET utilizzato come interruttore con carico verso massa.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Gli amplificatori di potenza sono classificati in cinque classi di funzionamento. Descrivi brevemente le caratteristiche di ciascuna classe.
2. Come sono definiti il rendimento di conversione e la figura di merito? A che cosa servono?
3. Illustra le problematiche connesse all'impiego del transistor bipolare come elemento di commutazione.
4. Illustra le problematiche connesse all'impiego del transistor NMOS come elemento di commutazione.
5. Quando un transistor MOS viene impiegato in commutazione con carichi induttivi, subisce un degrado del comportamento e di affidabilità. A causa di quale fenomeno?

CAP 3 TIRISTORI

Concetti chiave

- Angolo di conduzione
- Area di sicuro innesco
- Corrente di aggancio
- Corrente di mantenimento
- Tensione di breakover
- Velocità di variazione della tensione critica dV/dt

DIAC – Diode alternate current
TRIAC – Triode AC semiconductor/Bi-directional triode thyristor
GTO – Gate turn-off

1 SCR
2 Diac
3 Triac
4 GTO
5 Circuiti applicativi dei tiristori

I tiristori sono una famiglia dei componenti di silicio che, in condizioni operative normali, sono in stato di interdizione (**circuito aperto**) ma, per effetto di un apposito comando o al raggiungimento di un'adeguata differenza di potenziale applicata ai loro capi, possono andare in conduzione (**circuito chiuso**) sopportando correnti elevate con basse cadute di tensione.

I principali dispositivi che manifestano queste caratteristiche sono: SCR, **DIAC**, **TRIAC**, **GTO**.

1 SCR

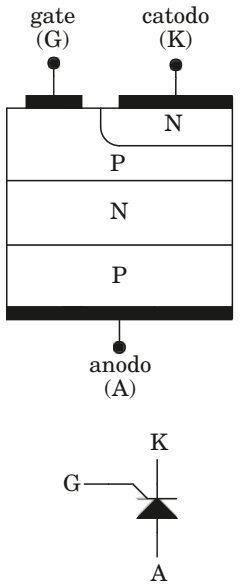


Fig. 3.1
Struttura interna di un SCR e suo simbolo grafico.

Il **rettificatore controllato al silicio** (SCR) è un componente a semiconduttore con una struttura P-N-P-N (▸ ***Fig. 3.1***). Possiede tre terminali: due permettono l'accesso agli estremi del semiconduttore e sono detti **anodo** e **catodo**, il terzo, detto **gate**, controlla la conduzione del circuito.

Le caratteristiche voltamperometriche dell'uscita corrente-tensione anodo-catodo mostrano che la variazione della tensione di breakover dipende dalla corrente di gate (▸ ***Fig. 3.2***). Se polarizzato direttamente, in assenza di qualsiasi segnale di gate il dispositivo si comporta come un circuito aperto finché la tensione anodo-catodo non raggiunge la **tensione di breakover** o **di breakdown** (V_{BO}); a questo punto il dispositivo entra in conduzione, la tensione diminuisce bruscamente e da quest'istante il componente si comporta come un normale diodo a giunzione. Se la struttura P-N-P-N viene polarizzata inversamente, il diodo si comporta come il diodo a giunzione e si ha la circolazione nel circuito della sola, debole corrente inversa dell'ordine dei nano-microampere.

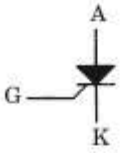
Una volta innescato, il dispositivo resta in conduzione finché:

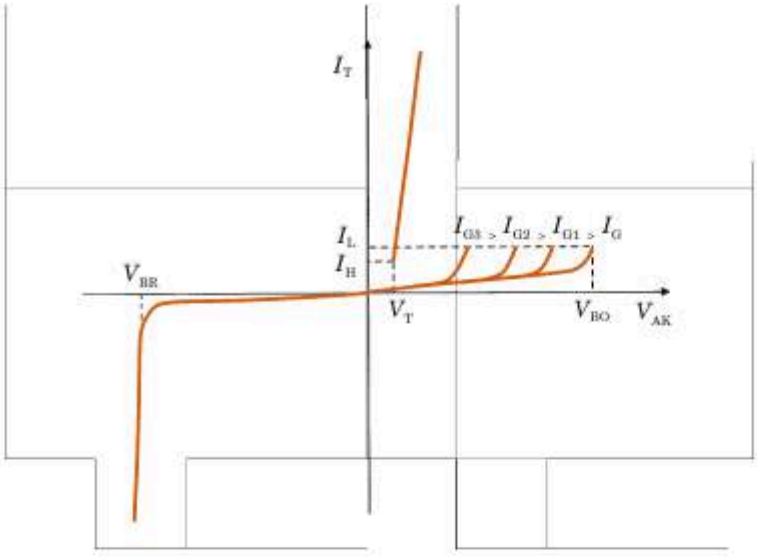
— la tensione anodo catodo non si annulla o si inverte; mentre nel funzionamento in alternata l'interdizione del dispositivo è ottenuta automaticamente, con il passaggio della tensione di rete per lo zero, in corrente continua, escludendo la possibilità di invertire la tensione applicata è necessario utilizzare un apposito circuito di spegnimento che agisca, o sulla tensione applicata, o sulla corrente circolante;
— la corrente diretta non scende al di sotto di un valore minimo, detto **valore di mantenimento** I_H.

V_{BO}
– Breakdown voltage open gate
I_H
– Holding current
I_{GT}
– Gate trigger current

Se, quando il diodo controllato è polarizzato direttamente, tramite l'ingresso di gate viene fornita una corrente di valore e di durata sufficiente (I_{GT}), il valore della tensione di breakover si riduce. Il diodo, in queste condizioni, può innescare con tensioni di polarizzazione più modeste.

Fig. 3.2
Caratteristica voltamperometrica di uscita di un diodo controllato (SCR).



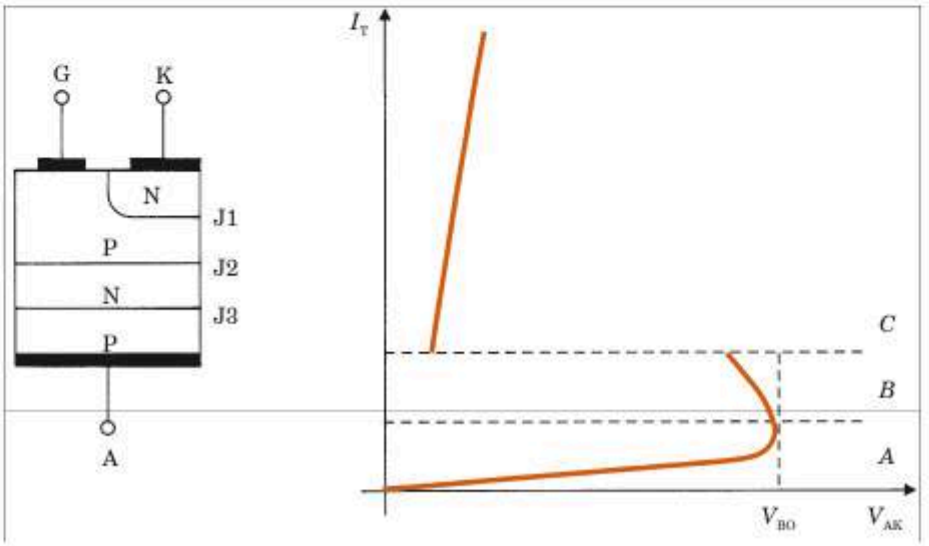


Principio di funzionamento

Per descrivere il principio di funzionamento del diodo SCR utilizziamo il modello a giunzioni della ***figura 3.3***. Il terminale di gate è sconnesso (I_G = 0), e viene applicata una tensione continua diretta. Le giunzioni J1 e J3 risultano polarizzate direttamente, mentre la giunzione intermedia J2 è polarizzata inversamente, per cui presenta un valore di impedenza notevolmente maggiore rispetto a quello delle altre due.

Se aumentiamo la tensione ai capi del diodo, il campo elettrico presente sulla giunzione J2 aumenta, provocando un incremento della corrente che fluisce nel diodo (regione *A* della figura 3.3) verso il circuito esterno. A un determinato valore della tensione diretta applicata, i portatori di carica delle due sezioni terminali di J2 acquistano in J2 un'energia sufficiente per spostare dei portatori addizionali, producendo una forma di rottura a valanga. Si ha un brusco aumento della corrente il cui valore è limitato solo dal carico esterno (regioni *A* e *B* della figura 3.3). La tensione di breakover dà inizio alla scarica disruptiva, dopodiché la caduta di

Fig. 3.3
Curva caratteristica corrente-tensione di un SCR con gate aperto.



tensione attraverso il diodo diminuisce rapidamente con l'aumentare della corrente. Sulla caratteristica si nota, nella regione *B*, un tratto a resistenza negativa perché la caduta diminuisce mentre la corrente aumenta.

La caduta di tensione nella zona centrale scende a circa 0 V, e in quest'istante quest'ultima si comporta sia da emettitore sia da collettore. Le due sezioni centrali si riempiono di cariche e l'impedenza generale assume un valore estremamente basso (fra la regione *B* e la *C* della figura 3.3). Ulteriori aumenti della corrente provocano la crescita lenta della **resistenza** (regione *C*). Il diodo resta in condizione di elevata conducibilità finché la corrente che lo attraversa rimane maggiore della **corrente di mantenimento** (I_H); al di sotto di essa il diodo ritorna allo stato di alta impedenza.

Quando è in stato di conduzione, il diodo ha tutte e tre le giunzioni polarizzate direttamente e le due regioni centrali sono sature di lacune ed elettroni. Per interdire il diodo è necessario applicare una tensione inversa. Le lacune e gli elettroni che si trovano nei pressi delle giunzioni J1 e J3 si diffondono generando una corrente inversa nel circuito esterno. Finché questa corrente resta apprezzabile, la caduta di tensione rimane piccola; soltanto quando le cariche, gli elettroni e le lacune che si trovano nelle vicinanze delle giunzioni J1 e J3 sono state rimossi la corrente cessa, le due giunzioni vengono polarizzate inversamente e il diodo si comporta come un circuito aperto (stato off).

Per calcolare la corrente circolante nell'SCR si può ricorrere al modello dell'analogia dei due transistor (▸ ***Fig. 3.4***). Le formule che permettono di calcolare la corrente circolante nell'SCR sono mostrate nella figura 3.4; tale corrente dipende dalle **correnti inverse** (I_{CBO}) dei due transistor e dal loro **guadagno di corrente a base comune** ($\alpha = I_C / I_E$).

In un transistor il valore del guadagno di corrente α varia, al variare della tensione collettore-emettitore V_{CE}, da bassi valori, inferiori all'unità, fino a valori prossimi all'unità. Applicando all'SCR valori di tensione anodo-catodo bassi, la somma dei guadagni di corrente ($\alpha_1 + \alpha_2$) dei due

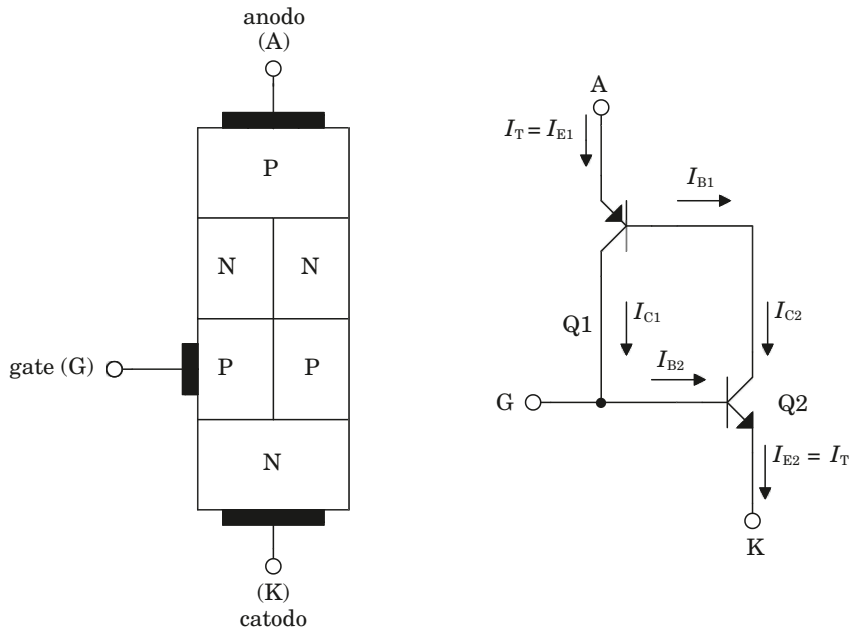


Fig. 3.4
Struttura delle giunzioni e modello a transistor bipolari di un SCR.

$$I_C = \alpha \cdot I_E + I_{CBO} \quad (1)$$

$$I_T = I_{E2} = I_{B2} + I_{C2} = I_{C1} + I_{C2} \quad (2)$$

$$I_T = \alpha_1 \cdot I_{E1} + I_{CBO1} + \alpha_2 \cdot I_{E2} + I_{CBO2} \quad (3)$$

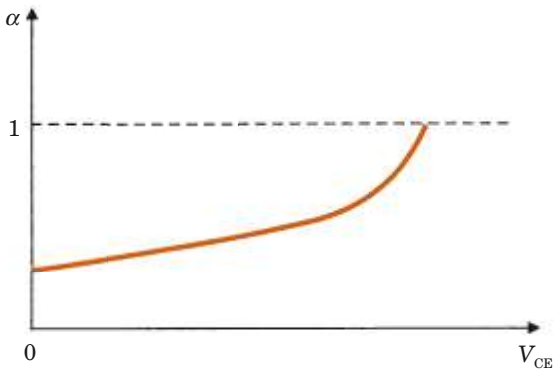
$$I_T = \frac{I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (4)$$

transistor del modello si mantiene molto inferiore all'unità perché i diodi sono costruiti in modo che alle basse correnti il guadagno α sia molto minore dell'unità e il valore della **corrente circolante** I_T è molto basso; tale corrente è nota come **corrente di fuga** (*leakage current*).

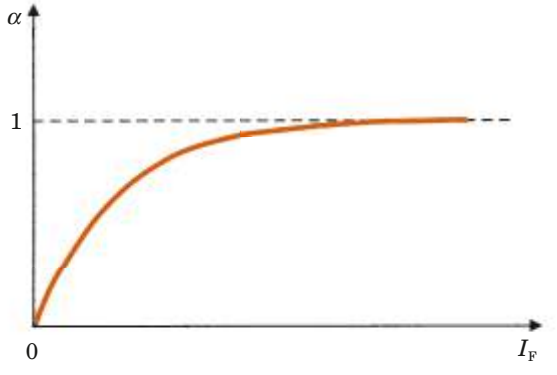
All'aumento della tensione diretta applicata all'SCR, cresce la caduta di tensione V_{CE} ai capi dei transistor, e di conseguenza i due guadagni di corrente α la cui somma si approssima all'unità. Mano a mano che la tensione diretta aumenta, la somma dei guadagni di corrente tende all'unità e, come si deduce dalla formula (4) della figura 3.4, la corrente circolante tende ad assumere un valore infinito (il denominatore tende a zero). Il valore di tensione al quale il fenomeno si manifesta è la **tensione di breakover** (indicata con V_{BO}).

In questa condizione di conduzione elevata i due transistor si saturano, la tensione V_{CE} diminuisce e di conseguenza si dovrebbe avere una riduzione del guadagno α; ma questo non avviene perché, invece, il guadagno aumenta all'aumentare della corrente di emettitore per cui, una volta stabilita la condizione di innesco, quest'ultima si automantiene (▸ ***Figg. 3.5a, b***).

Figg. 3.5a, b
Andamento del guadagno di corrente α:
a. in funzione della tensione V_{CE};
b. in funzione della corrente di emettitore.



3.5a



3.5b

Caratteristiche elettriche

I parametri caratteristici che stabiliscono i limiti di impiego di un diodo controllato riguardano i campi di variazione ammessi per la tensione e la corrente anodica, la tensione e la corrente di gate, la temperatura.

Tensioni e correnti anodiche

Nella ***tabella 3.1*** sono elencati i parametri di tensione e di corrente anodica, ricavati dai fogli tecnici, che caratterizzano un tiristore. Deduciamo dall'analisi della tabella che i valori massimi fanno riferimento a tre condizioni di lavoro:

1. una **condizione normale** relativa al funzionamento del dispositivo nello stato di conduzione (on) o di interdizione (off);
2. una **condizione di ripetitività** riguardante un valore del parametro più elevato del precedente, ma che si ripete a intervalli di tempo costanti;
3. una **condizione eccezionale** in cui la tensione supera episodicamente i due limiti precedenti (▸ ***Figg. 3.6a, b***).

Tabella 3.1 Parametri di tensione diretta e inversa che definiscono il comportamento dei tiristori

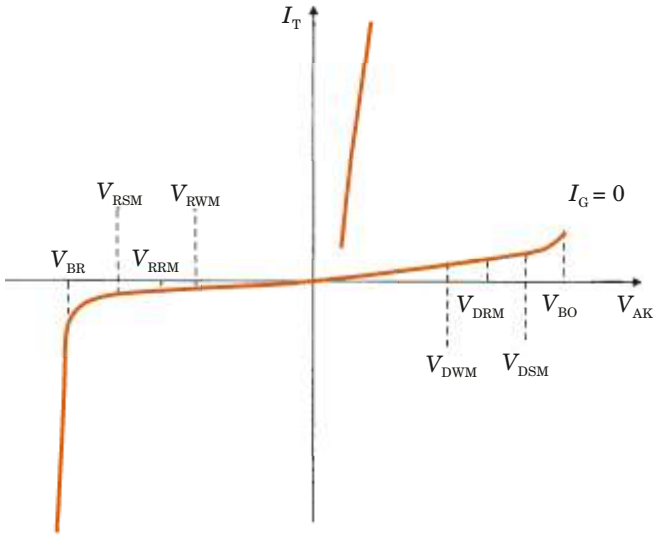
SIGLA DEL TIRISTORE		DESCRIZIONE
V_{DWM}	*Direct working max voltage*	è la massima tensione diretta applicabile all'SCR con continuità senza provocarne l'innesco per breakdown
V_{DRM}	*Direct repetitive max voltage*	è la massima tensione diretta applicabile all'SCR in modo ripetitivo senza provocarne l'innesco per breakdown
V_{DSM}	*Direct single max voltage*	è la massima tensione diretta applicabile all'SCR in modo episodico senza provocarne l'innesco per breakdown; l'impulso deve durare pochi μs
V_{RWM}	*Reverse working max voltage*	è la massima tensione inversa applicabile all'SCR con continuità
V_{RRM}	*Reverse repetitive max voltage*	è la massima tensione inversa applicabile all'SCR in modo ripetitivo
V_{RSM}	*Reverse single max voltage*	è la massima tensione inversa applicabile all'SCR in modo non ripetitivo

I limiti della corrente diretta sono definiti dalla massima corrente efficace $I_{T(rms)}$ e dalla massima corrente media $I_{T(AV)}$ (*average current*) che può circolare nel componente in conduzione (▸ ***Fig. 3.7***).

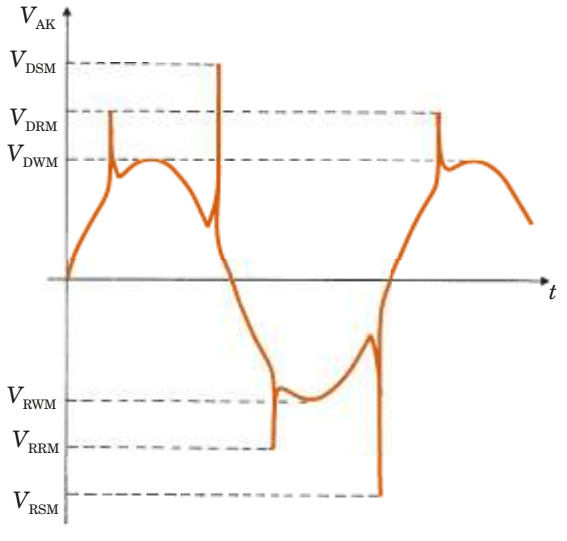
La **corrente di mantenimento** I_H (*holding current*) rappresenta la minima corrente in grado di mantenere il tiristore nella condizione on.
La **corrente di aggancio** I_L (*latching current*) è la minima corrente anodica in grado di mantenere l'SCR in conduzione dopo che si è verificata la commutazione off-on.

La **massima potenza dissipabile** entro un tiristore dipende, come per gli altri semiconduttori, dal tipo di materiale e dalla resistenza termica giunzione-ambiente (R_{thja}) che caratterizza il contenitore. Per il dimensionamento di un eventuale dissipatore di calore, i costruttori forniscono anche il valore della resistenza termica giunzione-contenitore (R_{thjc}).

Figg. 3.6a, b
Caratteristiche di uscita di un SCR:
a. definizione delle tensioni dirette;
b. definizione delle tensioni inverse.

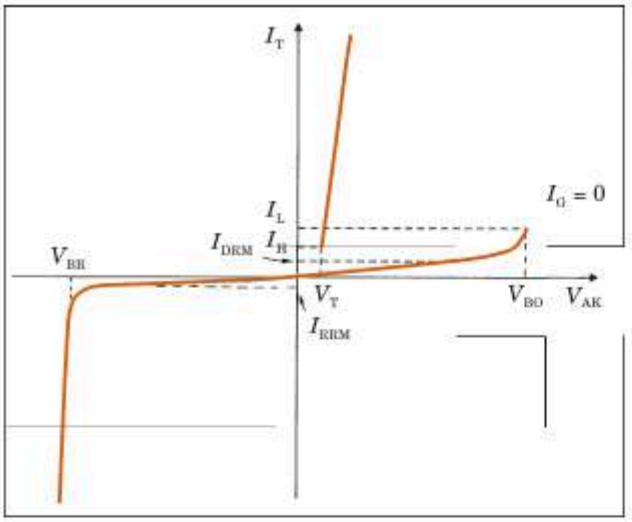


3.6a



3.6b

Fig. 3.7
Curva caratteristica di un SCR: definizione delle correnti circolanti.

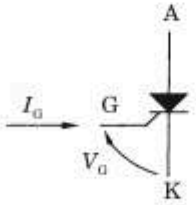


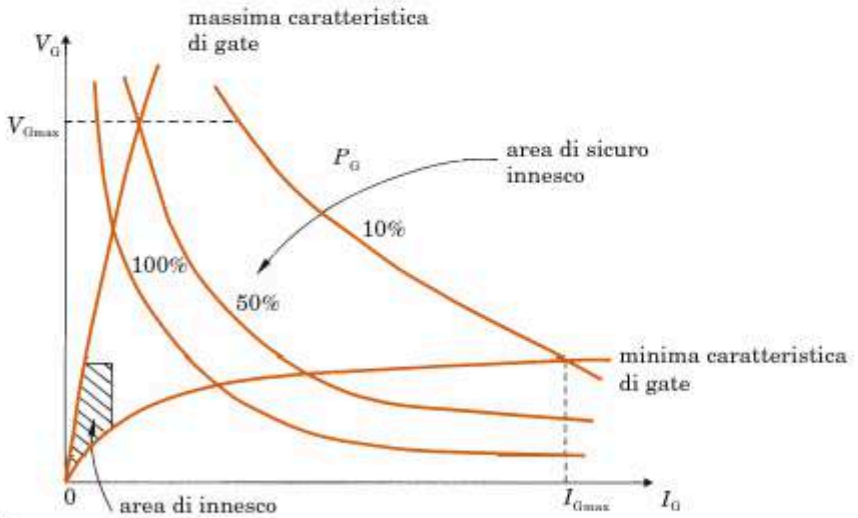
Condizioni di innesco

I parametri elettrici che caratterizzano l'ingresso di gate sono invece la minima corrente (I_{GT}) e la minima tensione gate-catodo (V_{GT}), che portano l'SCR in conduzione, e la potenza massima dissipabile dal gate P_{GM}.

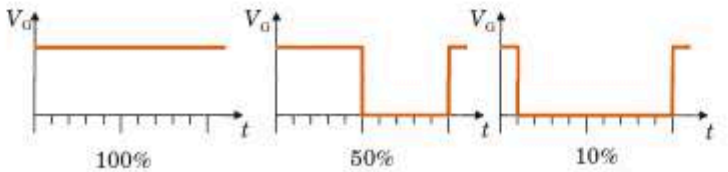
I valori dei parametri di innesco possono anche essere indicati per mezzo di un diagramma tensione di gate-corrente di gate misurato a temperatura costante; in questo caso due curve limite delimitano un insieme di valori di corrente e tensione di gate. Il circuito di innesco del diodo controllato dev'essere polarizzato in quest'area per ottenere un innesco sicuro del dispositivo; nella letteratura tecnica la si denomina, infatti, **area di sicuro innesco** (‣ ***Figg. 3.8a, b***).

Figg. 3.8a, b
Caratteristica di gate di un SCR:
a. curva tensione-corrente di gate;
b. impulsi di gate a duty-cycle variabile.





3.8a



3.8b

La curva mostra che la potenza massima dissipata dal gate aumenta se la durata dell'impulso è breve. Sono state tracciate tre curve di potenza del gate, caratterizzate da tre impulsi aventi un duty-cycle del 10, 50 e 100%. Notiamo che quanto più breve è l'impulso, tanto maggiore è la potenza applicata, e di conseguenza più elevata è la corrente di gate e più rapido l'innesco del tiristore.

Caratteristiche di commutazione

Quando viene applicato l'impulso di innesco dell'SCR, il dispositivo non si porta subito nello stato di conduzione (on), ma solo dopo un certo tempo. Il comportamento dinamico è dato dai seguenti parametri (▸ ***Fig. 3.9***):

— il **tempo di ritardo** (*delay time*), è l'intervallo di tempo che intercorre fra l'applicazione dell'impulso di gate e la commutazione del tiristore dall'interdizione alla piena conduzione;
— il **tempo di salita** (*rise time*) della corrente anodica, è il tempo impiegato da quest'ultima per passare dal 10 al 90% del suo valore finale;
— il **tempo di spegnimento** (t_{off} o t_q) (*turn-off time*), è l'intervallo di tempo che intercorre fra lo spegnimento dell'SCR e la riattivazione del controllo dell'innesco tramite l'ingresso di gate; questo tempo è limitato dagli effetti di immagazzinamento dei portatori minoritari;
— il **tempo di innesco** (t_{on} o t_{gt}) (*turn-on time*), è l'intervallo di tempo necessario perché l'SCR entri in conduzione dopo che è stato inviato il comando di gate; il suo valore diminuisce all'aumentare dell'ampiezza del comando di gate.

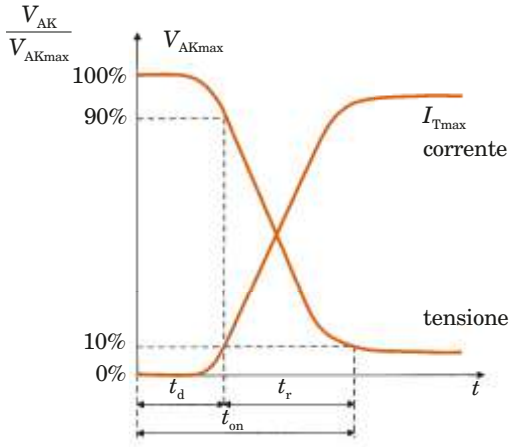


Fig. 3.9
Curva caratteristica di commutazione di un tiristore.

t_d tempo di ritardo
t_r tempo di salita
t_{on} tempo di commutazione allo stato on

Potenza dissipata

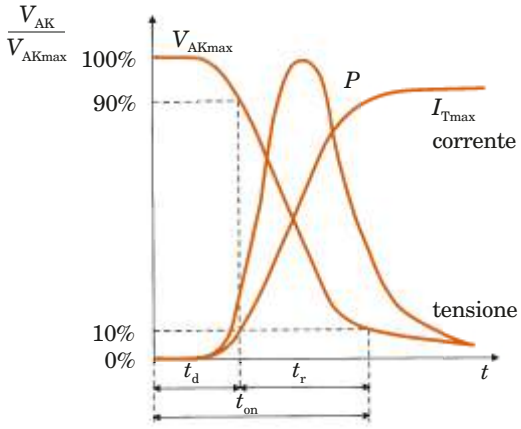
Le condizioni di funzionamento in cui è importante valutare la potenza dissipata sono due: nella fase di conduzione e durante la commutazione.

La **potenza dissipata nella fase di conduzione** è data dal prodotto fra la tensione di soglia e la corrente che circola nel diodo; il suo valore varia, quindi, con lo stesso andamento delle variazioni della corrente nel carico.

La **potenza dissipata durante la commutazione** è dovuta al fatto che per brevi istanti di tempo durante la transizione, per esempio dall'interdizione alla saturazione, si verifica una situazione in cui la corrente ha già assunto valori elevati mentre la tensione, che sta diminuendo, non ha ancora raggiunto il valore di soglia, per cui la dissipazione è elevata (▸ ***Fig. 3.10***). Tale dissipazione, quindi, è tanto più elevata quanto

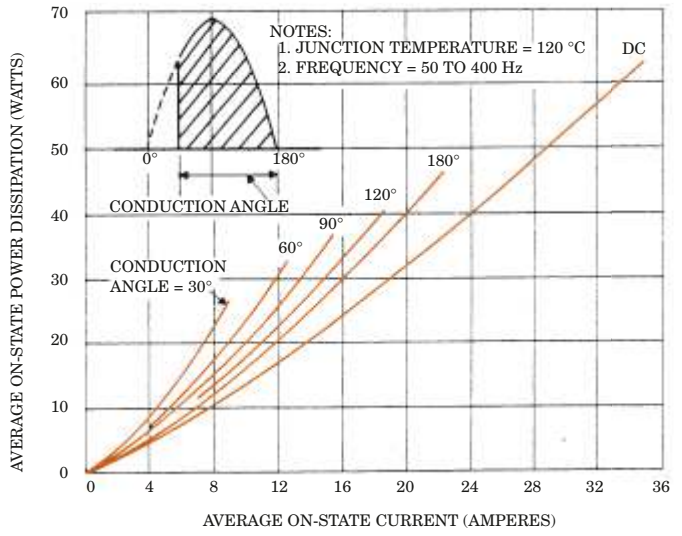
più è elevata la frequenza delle commutazioni. La potenza dissipata sull'SCR durante le commutazioni e quando è in conduzione nello stato on produce una notevole quantità di calore, che dev'essere dissipata dal contenitore verso l'ambiente per evitare che la temperatura della giunzione superi i valori massimi consentiti. La potenza dissipata dipende dalla corrente media (I_{av}) circolante nel carico, che a sua volta dipende dall'angolo di conduzione che rappresenta il periodo di conduzione dell'SCR nel semiperiodo (▸ ***Fig. 3.11***). Se necessario il tiristore va montato su dissipatori di calore capaci di smaltire il calore prodotto durante il funzionamento (▸ ***Vol. 1, Mod. C, Cap. 8***, scaricabile dal sito Internet).

Fig. 3.10
Andamento della potenza, della tensione e della corrente durante la commutazione dallo stato di interdizione allo stato di conduzione.



3.10

Fig. 3.11
Andamento della potenza dissipata in funzione della corrente diretta media per vari valori dell'angolo di conduzione (*fonte*: General Electric).



3.11

Altri parametri importanti

Oltre al valore assoluto della tensione anodica applicata a un tiristore, è importante la massima velocità di variazione della tensione espressa da dV/dt, detta **velocità di variazione della tensione critica**. Se quest'ultima viene superata, per esempio all'accensione, il dispositivo può entrare in conduzione anche se la tensione applicata non ha raggiunto il valore di breakdown. Questo effetto è dovuto alla capacità associata alla giunzione PN: una variazione di tensione genera una corrente che può essere sufficiente a portare il diodo controllato in conduzione (▸ ***Fig. 3.12***). Il parametro dV/dt viene di solito corretto con un'apposita rete RC (*snubber network*) posta tra l'anodo e il catodo del diodo controllato.

I valori della resistenza e del condensatore della rete RC dipendono dal tiristore prescelto e dal carico controllato. La resistenza è tipicamente compresa fra 50 e 100 Ω (≥ 5 W), mentre il condensatore varia fra 100 e 220 nF (≥ 630 V). La potenza della resistenza e la tensione di lavoro del condensatore dipendono dalla tensione applicata e dal carico controllato.

Anche la velocità di variazione della corrente anodica dI/dt non può superare un valore massimo, oltre il quale la distribuzione non uniforme della corrente nell'istante di innesco provoca l'insorgere nelle giunzioni di punti caldi (*hot spots*) che possono distruggere in modo irreparabile il tiristore. La velocità di salita della corrente dI/dt può essere limitata sul carico resistivo ponendo in serie al tiristore un induttore dimensionato con la formula:

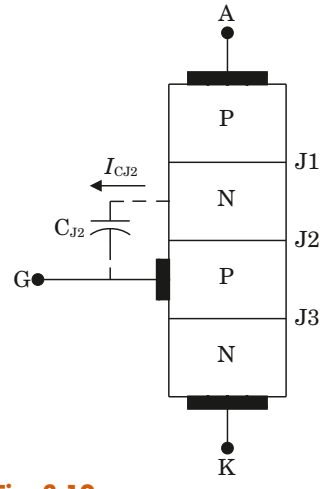


Fig. 3.12
Effetto della capacità di giunzione sul parametro dV/dt.

$$I_{C_{J2}} = C_{J2} \cdot \frac{dV_{AK}}{dt}$$

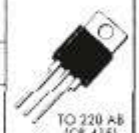
$$L_{\min} = \frac{V_{AC(\max)}}{(dI / dt)_{\max}} \qquad (3.1)$$

Il problema viene parzialmente risolto ponendo in serie al tiristore induttanze facilmente saturabili (per esempio quelle a filo avvolto su un nucleo a perlina). Nella fase iniziale del transitorio, l'alto valore dell'induttanza fa sì che la variazione della corrente sia rallentata; successivamente, instauratasi una forte corrente, l'induttanza si satura e si autoesclude.

Il parametro I^2t è un indice che permette di valutare la capacità del tiristore di sopportare la circolazione non ripetitiva di una extracorrente; viene utilizzato per valutare le caratteristiche di un eventuale fusibile di protezione da collegare in serie. Il fusibile deve poter intervenire prima che il limite fissato da questo paramento venga superato.

La ***figura 3.13*** mostra i valori parametrici tipici degli SCR.

Fig. 3.13
Parametri caratteristici degli SCR (*fonte*: International Rectifier).

Types	I_O (A)	V_{RRM} = V_{DRM} (V)	I_{TSM} 10 ms (A)	I_{RM} @ V_{RRM} I_{DM} @ V_{DRM} T_j max max (mA)	T_{amb} = 25°C V_{GT} max (V)	I_{GT} max (mA)	V_{TM} / I_{TM} max (V) (A)	dv/dt @ 67% V_{DRM} T_j max min (V/µs)	di/dt max (A/µs)	Case
8 Arms / T_{case} = 75°C T_j = 110°C I^2t = 32 A^2s										TO 220 AB (CB-415) SEE NOTE
TYN 058,G,K TYN 108,G,K TYN 208,G,K TYN 408,G,K TYN 608,G,K TYN 808,G,K TYN 1008,G,K	5	50 100 200 400 600 800 1000	80	2	1,1	Without suffix : 15 With suffix G : 25 With suffix K : 40	1,6 (15)	50	50	
10 Arms / T_{case} = 75°C T_j = 110°C I^2t = 50 A^2s										
TYN 0510 TYN 110 TYN 210 TYN 410 TYN 610 TYN 810 TYN 1010	6,4	50 100 200 400 600 800 1000	100	2	1,5	15	1,6 (20)	50	50	
16 Arms / T_{case} = 75°C T_j = 125°C I^2t = 128 A^2s										
TYN 0516 TYN 116 TYN 216 TYN 416 TYN 616	10	50 100 200 400 600	160	3	1,5	25	1,6 (32)	50	100	
25 Arms / T_{case} = 65°C T_j = 125°C I^2t = 200 A^2s										 TO 220 AB (CB-415)
TYN 682 TYN 683 TYN 685 TYN 688 TYN 690	16	50 100 200 400 600	200	3	1,1	25	1,4 (50)	50	100	
30 Arms / T_{case} = 65°C T_j = 110°C I^2t = 800 A^2s Insulating voltage = 2500 V_{RMS}										
Insulated: BTW 66-200 … BTW 66-1200 Uninsulated: BTW 66-200N … BTW 66-1200N	20	200 400 600 800 1000 1200	400	3	3	50	2,2 (60)	50	100	
40 Arms / T_{case} = 65°C T_j = 110°C I^2t = 1250 A^2s Insulating voltage = 2500 V_{RMS}										RD 91 (CB-332)
Insulated: BTW 67-200 … BTW 67-1200 Uninsulated: BTW 67-200N … BTW 67-1200N	25	200 400 600 800 1000 1200	500	6	3	80	2 (80)	50	100	

Rappresentazione grafica

Simbolo grafico e lettera di identificazione

Il simbolo grafico dell'SCR riproduce il comportamento fisico del dispositivo. Al simbolo del diodo a giunzione viene aggiunto, disegnato dalla parte del catodo, il terminale di controllo (*gate*). Negli schemi elettrici il disegnatore utilizza lo stesso identificatore usato per i diodi, cioè le lettere: CR o D (▸ ***Fig. 3.14***); è usata anche la sigla (non a norma) SCR.

Sigla commerciale e tipo di contenitore

La sigla dell'SCR è stampigliata sul contenitore (per la sua lettura e interpretazione (▸ ***Vol. 2, Mod. B, Cap. 2***). Nei diodi controllati di potenza la posizione del catodo viene indicata dalla riproduzione, sul contenitore, del simbolo grafico del diodo e della sigla di identificazione. Il contenitore può essere di tipo plastico e metallico. Le dimensioni di ingombro e le forme sono molto varie perché questi dispositivi possono controllare da pochi fino a qualche centinaio di watt. Il calore che deve essere dissipato richiede contenitori con superfici e forme adeguate alla potenza controllata (▸ ***Fig. 3.15***).

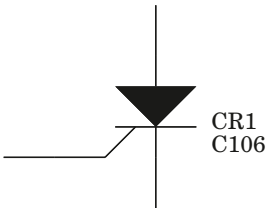


Fig. 3.14
Identificazione di un SCR.

Applicazioni

Gli SCR si comportano come un interruttore comandato ad alto rendimento. Con un piccolo consumo di potenza di pilotaggio si può controllare il trasferimento di potenze notevoli fra generatore e carico. Si utilizzano:

— come rettificatori;
— come interruttori di potenza **(SSR)**, per completare o interrompere un circuito senza avere parti in movimento;
— come controllori del trasferimento di potenza da un generatore a un utilizzatore tramite l'impulso di gate (inverter, controlli di fase).

SSR
– Solid state relay
RF
– Radio frequency
UPS
– Uninterruptible power supply

Gli SCR sono un'alternativa valida ai relè elettromeccanici. Questi ultimi offrono il vantaggio di operare su più vie, ma presentano molti inconvenienti: scarsa velocità di commutazione, presenza di archi voltaici e di rimbalzi fra i contatti, usura rapida (e quindi manutenzione frequente), elevata sensibilità alle sollecitazioni meccaniche (urti, vibrazioni, trasporto). Gli SCR sono invece caratterizzati da: elevata velocità di commutazione, buon rendimento, ottima affidabilità, vita elettrica lunga, notevole compattezza meccanica, totale assenza di rimbalzi e di archi voltaici. Hanno però lo svantaggio, nello stato di non conduzione, di una corrente di perdita rilevante (qualche decina di milliampere) e sono sensibili ai transitori di tensione presenti sulla rete che, se non prevenuti, possono portare all'autoinnesco del tiristore. Nello stato di conduzione presentano una caduta di tensione bassa, ma non nulla, per cui, quando sono percorsi da forti correnti, determinano un'alta dissipazione di potenza. È quindi necessario dimensionare con cura il dissipatore di calore, che deve garantire il non superamento della temperatura massima raggiungibile dalla giunzione. Tipiche applicazioni degli SCR sono:

— gli alimentatori, gli inverter e i chopper di potenza ad alta frequenza;
— gli apparecchi di saldatura e di riscaldamento a induzione **RF**;
— le lampade fluorescenti;
— i gruppi di continuità **(UPS)** a 400 Hz;
— gli inverter a modulazione di impulsi (PWM);
— i generatori a ultrasuoni;
— il pilotaggio di motori in corrente continua e alternata lineare e on-off.

Fig. 3.15
Forma del contenitore di un SCR.

2 DIAC

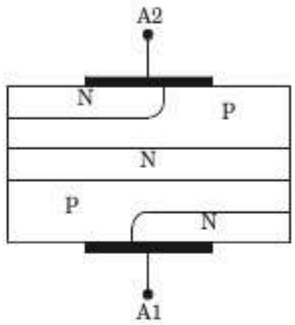
Il Diac è un diodo bidirezionale formato da due strutture P-N-P-N in parallelo (▸ ***Fig. 3.16***).

La ***figura 3.17*** mostra la caratteristica corrente-tensione del Diac. In mancanza del terminale di gate il dispositivo può andare in conduzione solo quando la tensione di polarizzazione diretta e/o inversa supera il valore di breakover (V_{BO}); i valori tipici della tensione di breakdown sono compresi fra 28 ÷ 40 V. Quando il Diac entra in conduzione, la tensione ai suoi capi si riduce di pochi volt (20 ÷ 26 V) e presenta un valore resistivo relativamente basso.

La ***figura 3.18*** mostra il simbolo grafico utilizzato negli schemi elettrici per rappresentare il Diac.

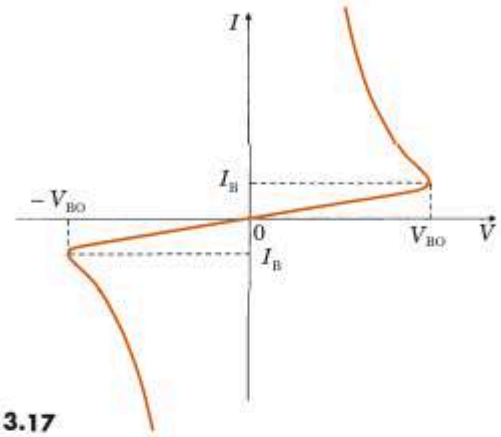
La ***figura 3.19*** mostra i valori parametrici che caratterizzano i Diac.

Fig. 3.16
Struttura interna di un Diac.



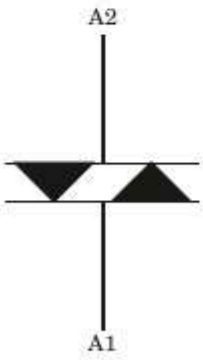
3.16

Fig. 3.17
Caratteristica corrente-tensione di un Diac.



3.17

Fig. 3.18
Simbolo grafico di un Diac.



3.18

Fig. 3.19
Parametri caratteristici dei Diac (*fonte*: Thompson Semiconductors).

Types	Breakover voltage *Tension de retournement* (V)			Breakover voltage symmetry *Symétrie de la tension de retournement* ΔV max (V)	Breakover current *Courant de retournement* I_B max. (μA)	ΔV between 0 and 10 mA *ΔV entre 0 et 10 mA* min. (V)	Case
	min	nom	max				
DB 3	28	32	36	± 3	100	5	DO 35 glass verre (CB-102)
DB 4	35	40	45	± 3	100	5	
DC 34	30	34	38	± 3	50	5	
DC 38	35	38	42	± 3	50	5	
DC 42	39	42	45	± 3	50	5	

3.19

PER FISSARE I CONCETTI

1. Che cos'è un tiristore?
2. Descrivi brevemente il principio di funzionamento di un SCR.
3. Quali sono le caratteristiche tecniche di un Diac?

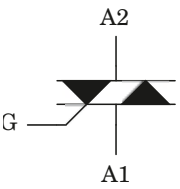
3 TRIAC

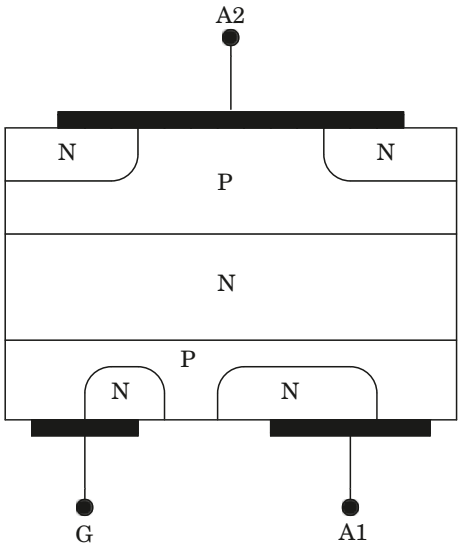
Il Triac è un componente semiconduttore che riunisce due strutture P-N-P-N in antiparallelo (▸ ***Fig. 3.20***). I due terminali collegati agli estremi della struttura vengono chiamati **terminali principali** o **anodi** (*main terminal*) e vengono indicati con le sigle A1 (MT1) e A2 (MT2); il terminale di controllo viene chiamato gate G.

Il Triac funziona come un SCR, con l'unica differenza che può essere portato in conduzione in entrambe le direzioni da un segnale di innesco applicato al terminale di gate, positivo o negativo in funzione del verso della tensione applicata sugli anodi.

Una corrente di gate di valore e durata opportuni riduce il valore della tensione di breakover e permette al dispositivo di entrare in conduzione con le stesse modalità di funzionamento descritte per il diodo controllato (SCR). Una volta innescato, il dispositivo resta in conduzione finché la corrente scende sotto il valore di mantenimento o la tensione applicata fra i terminali principali si annulla oppure si inverte.

Fig. 3.20
Struttura e simbolo grafico di un Triac.





Caratteristiche elettriche

Le caratteristiche voltamperometriche dell'uscita corrente-tensione fra gli anodi principali mostrano che, come nel caso dell'SCR, la variazione della tensione di breakover dipende dalla corrente di gate (▸ ***Fig. 3.21***).

Un Triac può essere posto in conduzione applicando fra i terminali A1 e A2 una tensione che supera la tensione di breakover V_{BO}, oppure applicando un impulso di corrente, positivo o negativo, al terminale di gate. Sono possibili quattro diversi modi di funzionamento (▸ ***Fig. 3.22***) definiti rispetto ai quadranti, che convenzionalmente si riferiscono alla polarità reciproca dei terminali del TRIAC, e in particolare degli elettrodi A2 e gate rispetto al terminale A1 preso come riferimento:

1. terminale A2 positivo, corrente e tensione di gate positiva;
2. terminale A2 positivo, corrente e tensione di gate negativa;
3. terminale A2 negativo, corrente e tensione di gate positiva;
4. terminale A2 negativo, corrente e tensione di gate negativa.

Fig. 3.21
Caratteristica voltamperometrica di uscita di un Triac.

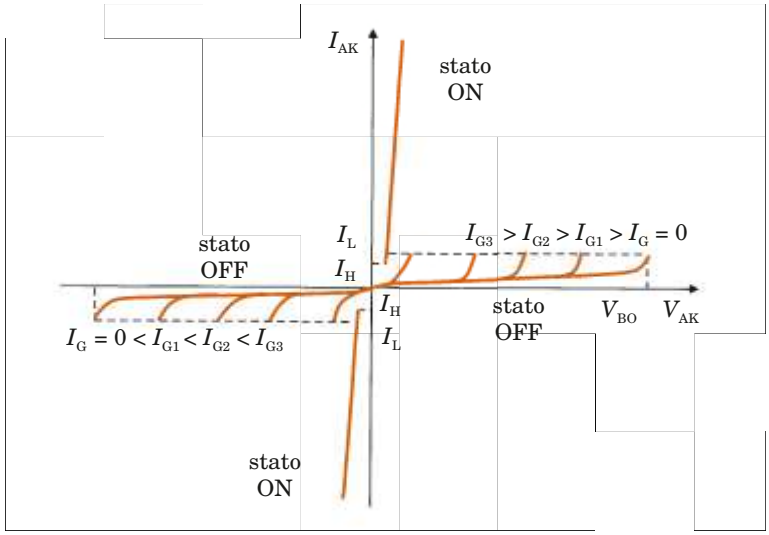
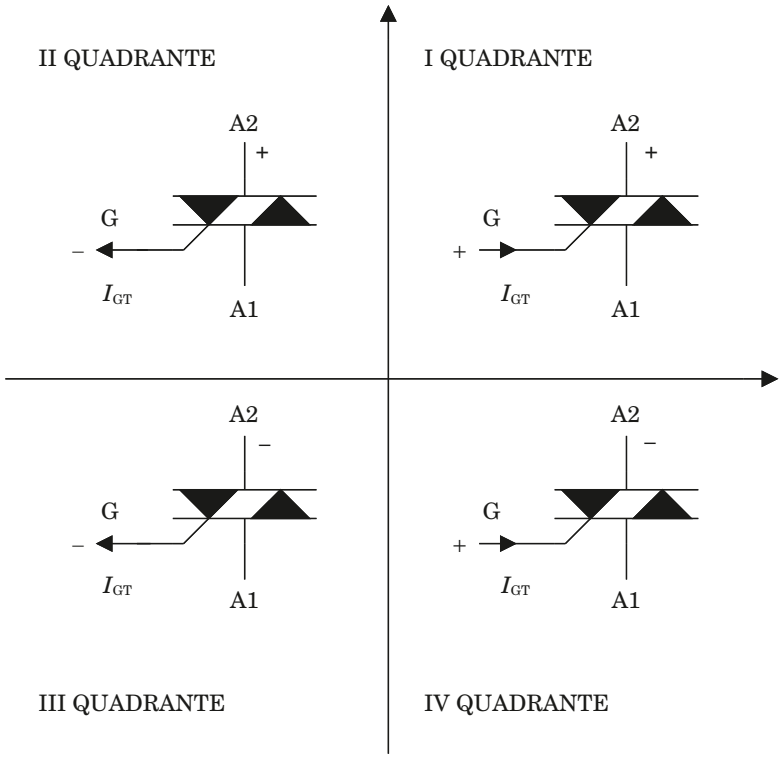


Fig. 3.22
Definizione dei quadranti di innesco per un Triac.



La ***figura 3.23*** mostra il meccanismo di trigger e il flusso di corrente anodica nel Triac. La linea tratteggiata evidenzia il percorso della corrente di gate, quella continua il percorso della corrente anodica.

Il valore della **corrente anodica** influenza la corrente di gate, per cui la quantità di corrente necessaria per innescare il Triac differisce a seconda del quadrante utilizzato. Il flusso nello stesso senso della corrente anodica e della corrente di gate richiede una corrente di trigger minore di quella richiesta dal flusso in senso opposto delle due correnti. Osservando le strutture si nota che la sensibilità del Triac è maggiore nel primo e nel terzo modo di funzionamento.

Il modulo della **corrente di trigger** varia al variare della temperatura della giunzione. L'aumento della temperatura incrementa l'eccitazione termica delle cariche all'interno del semiconduttore, provocando l'aumento della **corrente di fuga** (*leakage current*) e rendendo più probabile l'innesco del tiristore, per cui il gate, per effetto della maggiore temperatura, diventa più sensibile in tutti e quattro i modi operativi (▸ ***Fig. 3.24***).

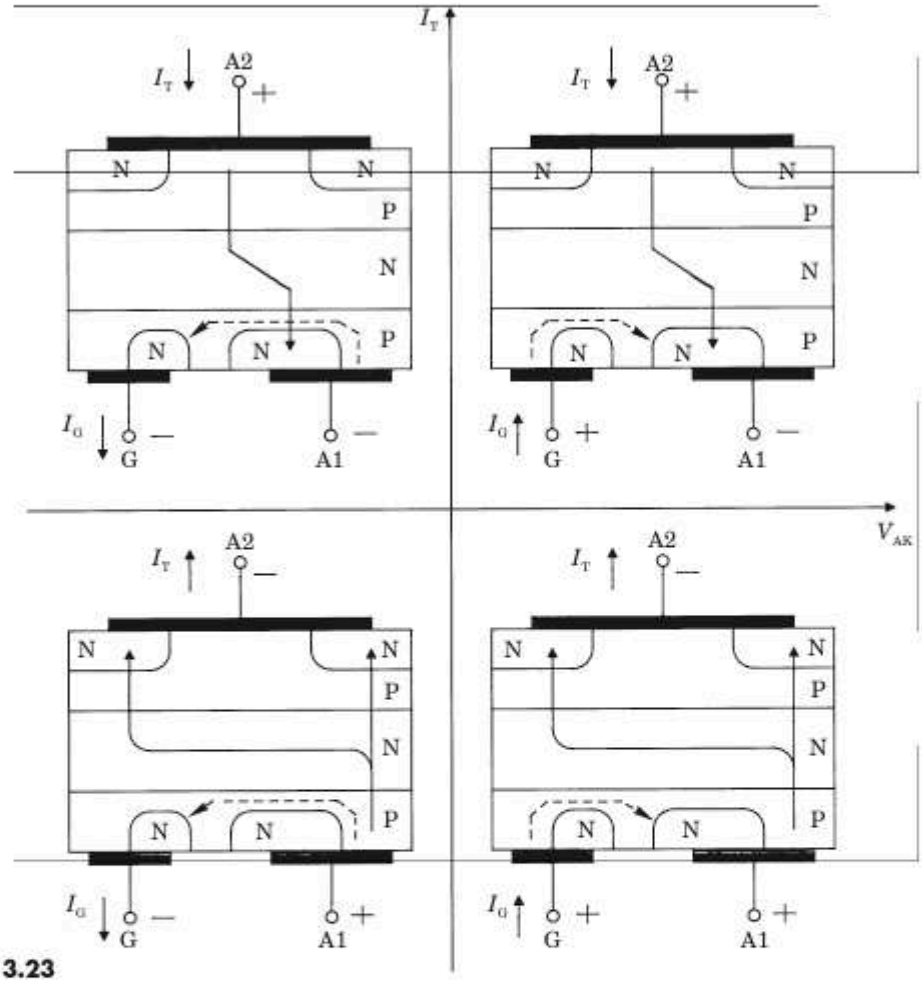


Fig. 3.23
Percorso del flusso delle correnti anodica e di innesco del gate nei vari modi di funzionamento di un Triac.

3.23

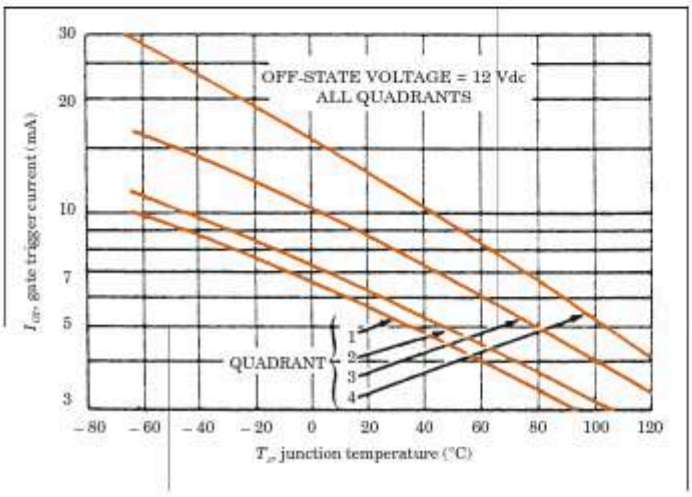


Fig. 3.24
Variazione della corrente di innesco di gate al variare della temperatura nei quattro quadranti.

3.24

L'intensità della **corrente di innesco** dipende dal quadrante di lavoro prescelto e varia notevolmente con la temperatura e con la durata dell'impulso (▸ ***Fig. 3.25***).

I valori della corrente di gate di innesco per ogni quadrante si ricavano dai fogli tecnici del dispositivo; i parametri caratteristici di un Triac sono gli stessi che abbiamo descritto per l'SCR.

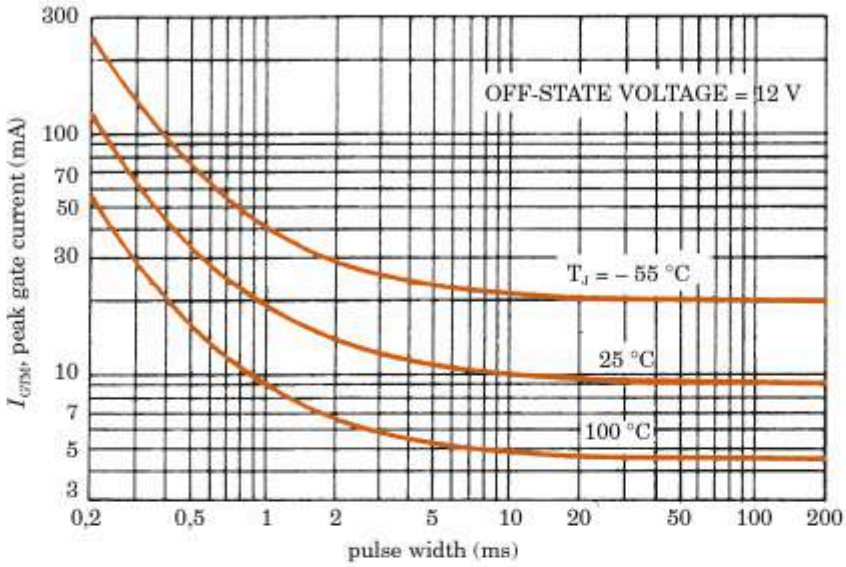


Fig. 3.25
Cambiamento della corrente di innesco di gate al variare della durata degli impulsi di innesco misurata, in uno dei quadranti, a tre diversi valori di temperatura.

Ovviamente, tutti i parametri caratteristici della conduzione diretta degli SCR sono definiti per il Triac anche in condizioni di polarizzazione inversa, ed essendo la struttura simmetrica, i parametri assumono in genere lo stesso valore assoluto.

I parametri principali sono:

— corrente diretta massima nello stato on;
— corrente diretta di picco ripetitiva massima nello stato on;
— tensione inversa massima;
— tensione di soglia;
— corrente massima di gate espressa per ogni quadrante;
— durata dell'impulso di gate che garantisce l'innesco sicuro della conduzione;
— corrente di mantenimento;
— dissipazione di potenza massima;
— tempi di commutazione fra stato on e stato off;
— temperatura di lavoro;
— velocità di variazione della tensione critica statica $(dV/dt)_b$, con il Triac bloccato nello stato off, e della tensione critica dinamica $(dV/dt)_c$ con il Triac in conduzione (b = blocking, c = conducting);
— velocità di variazione della corrente commutata statica $(dI/dt)_b$ e dinamica $(dI/dt)_c$.

I parametri che esprimono i valori massimi indicano i limiti fisici di funzionamento del dispositivo e nei progetti occorre verificare che non siano superati. La **tensione di soglia** dipende dal materiale e dalla tecnologia con cui il diodo è stato realizzato.

Fig. 3.26
Parametri caratteristici dei Triac in contenitori di plastica (*fonte*: International Rectifier).

Quando il Triac è impiegato per commutare carichi induttivi diventa importante valutare i parametri dV/dt e dI/dt statici e dinamici, e provvedere i circuiti applicativi delle opportune reti di protezione, come la rete RC, poste in parallelo al Triac, e l'induttanza posta in serie.

Nella ***figura 3.26*** sono riportati i valori parametrici che caratterizzano i Triac.

Types	V_{DRM} ± (V)	I_{TSM} 20 ms (A)	I_{DRM}* @ V_{DRM} max (mA)	Suffix	I_{GT} (mA) max I ++	II +−	III −−	IV −+	I_H max (mA)	V_{TM}/I_{TM} max (V) (A)	$(dv/dt)_c$* min (V/µs)	dv/dt* @ 67% V_{DRM} min (V/µs)	Case
6 Arms / T_{case} = 75°C T_j = 110°C I^2t = 36 A^2s													Insulating voltage = 2500 V_{RMS} : UL recognized for BTA series E81734(N)
Insulated: BTA 06-200, BTA 06-400, BTA 06-600, BTA 06-700 / Uninsulated: BTB 06-200, BTB 06-400, BTB 06-600, BTB 06-700 — With suffixes B,C	200 400 600 700	85	0,5	B	50	50	50	100	50	1,65 8,5	10	100	
				C	25	25	25	50	25	1,5 8,5	5	50	
8 Arms / T_{case} = 75°C T_j = 110°C I^2t = 36 A^2s													Insulating voltage = 2500 V_{RMS} : UL recognized for BTA series E81734(N)
Insulated: BTA 08-200, BTA 08-400, BTA 08-600, BTA 08-700 / Uninsulated: BTB 08-200, BTB 08-400, BTB 08-600, BTB 08-700 — With suffixes B,C	200 400 600 700	85	0,5	B	50	50	50	100	50	1,75 11	10	100	
				C	25	25	25	50	25	1,6 11	5	50	
10 Arms / T_{case} = 75°C T_j = 110°C I^2t = 66 A^2s													Insulating voltage = 2500 V_{RMS} : UL recognized for BTA series E81734(N)
Insulated: BTA 10-200, BTA 10-400, BTA 10-600, BTA 10-700 / Uninsulated: BTB 10-200, BTB 10-400, BTB 10-600, BTB 10-700 — With suffixes B,C	200 400 600 700	115	0,5	B	50	50	50	100	50	1,45 14	10	100	
				C	25	25	25	50	25		5	50	
12 Arms / T_{case} = 75°C T_j = 110°C I^2t = 66 A^2s													Insulating voltage = 2500 V_{RMS} : UL recognized for BTA series E81734(N)
Insulated: BTA 12-200, BTA 12-400, BTA 12-600, BTA 12-700 / Uninsulated: BTB 12-200, BTB 12-400, BTB 12-600, BTB 12-700 — With suffixes B,C	200 400 600 700	115	0,5	B	50	50	50	100	50	1,5 17	10	100	TO 220 AB (CB-415)
				C	25	25	25	50	25		5	50	
15 Arms / T_{case} = 90°C T_j = 125°C I^2t = 112,5 A^2s													
Uninsulated: BTB 15-200 B, BTB 15-400 B, BTB 15-600 B, BTB 15-700 B	200 400 600 700	150	2	B	50	50	50	75	50	1,5 21	10 typ	100	
16 Arms / T_{case} = 90°C T_j = 125°C I^2t = 162 A^2s													
Uninsulated: BTB 16-200 B, BTB 16-400 B, BTB 16-600 B, BTB 16-700 B	200 400 600 700	180	0,5	B	50	50	50	100	50	1,6 22,5	10	100	

* @ T_j max

Rappresentazione grafica

Simbolo grafico e lettera di identificazione

Il simbolo grafico del Triac riproduce due diodi in antiparallelo con un terminale di controllo, il gate, posto dalla parte del terminale principale A1.

Negli schemi elettrici il disegnatore utilizza come identificatore del Triac la lettera Q, la stessa usata per identificare i transistor (▸ ***Fig. 3.27***); è anche usata la sigla, non a norma, Triac.

Sigla commerciale e tipo di contenitore

La sigla impiegata dev'essere conforme alle norme generali dei semiconduttori (▸ ***Vol. 2, Mod. B, Cap. 2***) e di norma viene stampigliata dal costruttore sul corpo del contenitore. La forma e le dimensioni dipendono dal valore della corrente controllata, dalla tensione inversa massima applicabile e dalla potenza massima dissipabile (▸ ***Fig. 3.28***).

I contenitori dei Triac sono fabbricati:

— in materiale plastico TO-218, TO-220 per correnti fino a 15 A;
— in metallo TO-3, TO-60, TO-66, TO-205.

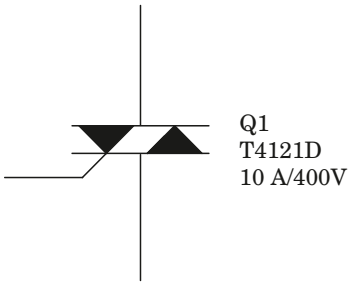


Fig. 3.27
Identificazione di un Triac.

TO-208AA
(TO-48)

Fig. 3.28
Forma del contenitore del Triac.

I Triac vengono suddivisi dai costruttori in: sensibili, standard e veloci.

I **Triac sensibili** possono essere innescati con I_{GT} comprese fra 3 e 10 mA nei primi tre quadranti e con correnti che variano fra 10 e 120 mA nel quarto quadrante. Il basso valore della corrente di innesco condiziona il valore massimo del rapporto d*V*/d*t* applicabile. I Triac sensibili commerciali possono commutare correnti di 8 A con tensioni di 800 V se racchiusi in un contenitore plastico.

I **Triac standard** richiedono correnti di gate di alcune decine di milliampere e possono commutare correnti di 40 A/800 V se racchiusi in un contenitore plastico e 60 A/1000 V se racchiusi in un contenitore metallico.

I **Triac veloci**, detti anche *alternistor*, sono costruiti con strutture interne particolari e sono in grado di commutare correnti da 3 a 10 volte superiori a quelle degli altri modelli. I rapporti d*V*/d*t* dinamici e statici sono sostanzialmente identici, per cui si rivelano particolarmente utili in quelle applicazioni in cui il carico è fortemente induttivo (motori) e per le quali in passato si doveva ricorrere alla connessione in antiparallelo di due SCR.

Il Triac trova valida applicazione nei regolatori di potenza in corrente alternata.

4 GTO

I GTO sono tiristori che possono essere portati in conduzione o in interdizione tramite un apposito comando applicato al terminale di gate.

Come l'SCR, il GTO, che ha un funzionamento di tipo unidirezionale, può essere posto in conduzione per il superamento della tensione breakover con il comando di gate, mentre può essere posto in interdizione con l'inversione della tensione di alimentazione, oppure con la diminuzione della corrente anodica al di sotto del valore di mantenimento o anche con il comando di gate.

Un GTO polarizzato direttamente (l'anodo più positivo del catodo) viene posto in conduzione da un impulso positivo di corrente (≅100 mA a 1,5 V per 1 µs) e interdetto, se in conduzione, da un impulso negativo di tensione (≅ –5 ÷ –10 V per 1 µs). Le tensioni inverse controllabili dal dispo-

sitivo fra anodo e catodo sono dell'ordine 100 ÷ 1000 V. In polarizzazione diretta il dispositivo si comporta come un interruttore controllato dal gate, per cui nella letteratura tecnica viene talvolta chiamato **SCS**.

SCS
– Gate controlled switch

La struttura di un GTO e la sua curva caratteristica corrente-tensione sono simili a quelle degli altri tiristori (▸ ***Fig. 3.29***).

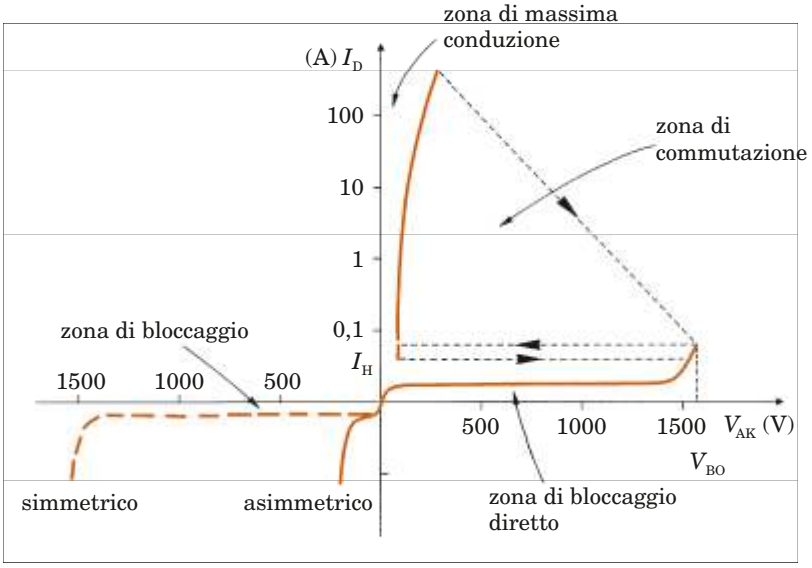


Fig. 3.29
Caratteristica corrente-tensione anodica di un GTO.

L'azione dell'impulso di comando di gate positivo, che permette di portare il GTO in conduzione, è analoga a quella dell'SCR. Per descrivere in che modo l'impulso negativo consente lo spegnimento del tiristore si utilizza lo stesso modello a transistor complementare utilizzato in precedenza per l'SCR (▸ ***Fig. 3.30***).

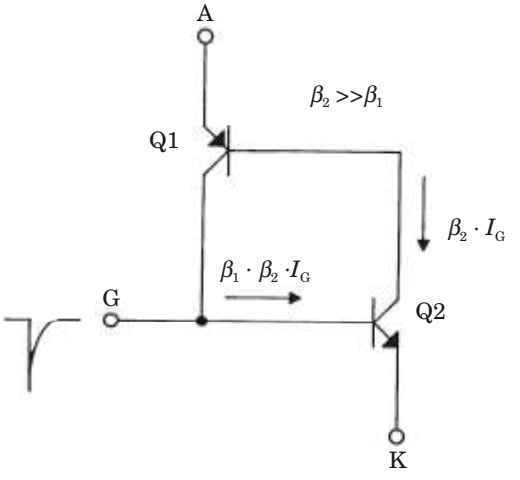


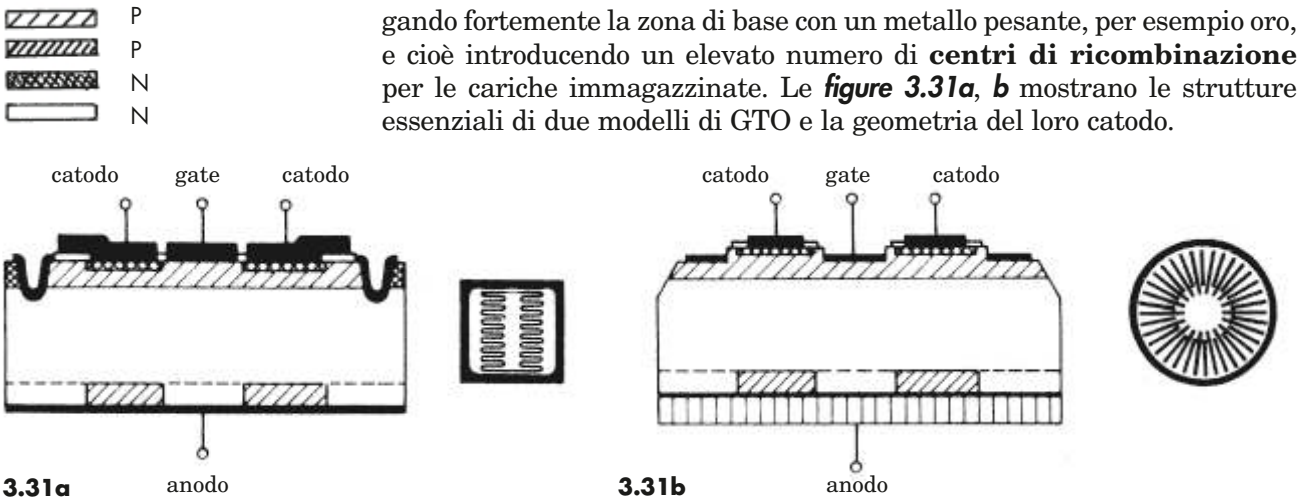
Fig. 3.30
Modello funzionale di un GTO.

Il transistor NPN è realizzato in modo tale che il suo guadagno di corrente β_2 sia maggiore di quello che caratterizza il transistor PNP, per cui la corrente anodica circola in gran parte nel collettore di Q2. L'impulso negativo applicato al gate del GTO abbassa bruscamente la corrente di base del transistor NPN e genera un percorso a bassa impedenza dove scorre la corrente di collettore di Q1. I due effetti combinati fanno sì che la corrente anodica scenda al di sotto del valore di mantenimento, provocando il blocco della conduzione e la commutazione del GTO nello stato off.

Durante la fase di bloccaggio della corrente anodica permane, per un certo intervallo di tempo, uno strascico di corrente anodica di basso valore detta **corrente di coda** (*tail current*), dovuta alle cariche immagazzinate nelle regioni N della base. Per ridurre questa corrente vengono realizzati due tipi di GTO: il tipo simmetrico e il tipo asimmetrico.

I **GTO simmetrici** possono bloccare la corrente sia in senso diretto che in senso inverso. La diminuzione della corrente di coda è ottenuta drogando fortemente la zona di base con un metallo pesante, per esempio oro, e cioè introducendo un elevato numero di **centri di ricombinazione** per le cariche immagazzinate. Le ***figure 3.31a***, ***b*** mostrano le strutture essenziali di due modelli di GTO e la geometria del loro catodo.

Figg. 3.31a, b
Struttura essenziale e geometria del catodo di un GTO:
a. dispositivo di piccola potenza;
b. dispositivo di grande potenza.



3.31a **3.31b**

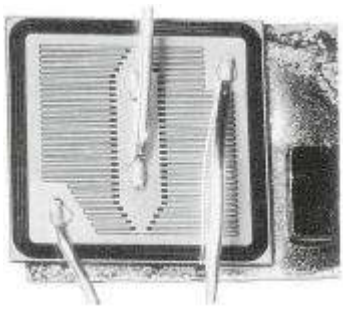


Fig. 3.32
Geometria del catodo del chip del GTO BTV 60 (*fonte*: Philips).

Nel primo modello (▸ ***Fig. 3.31a***), un dispositivo di piccola potenza, i contatti per gli elettrodi esterni sono realizzati in tecnologia *bonding* (filo in oro o alluminio saldato per termocompressione); nel secondo, il chip (*pellet*) è di grandi dimensioni, i contatti dei terminali del gate e del catodo sono a pressione e nel chip si trovano su due livelli differenti.

La ***figura 3.32*** evidenzia la geometria del catodo di un GTO a struttura fine.

Nei **GTO asimmetrici**, la ricombinazione delle cariche intrappolate viene facilitata cortocircuitando la regione N di base con la metallizzazione dell'anodo-emettitore. La ***figura 3.33*** mostra la struttura del

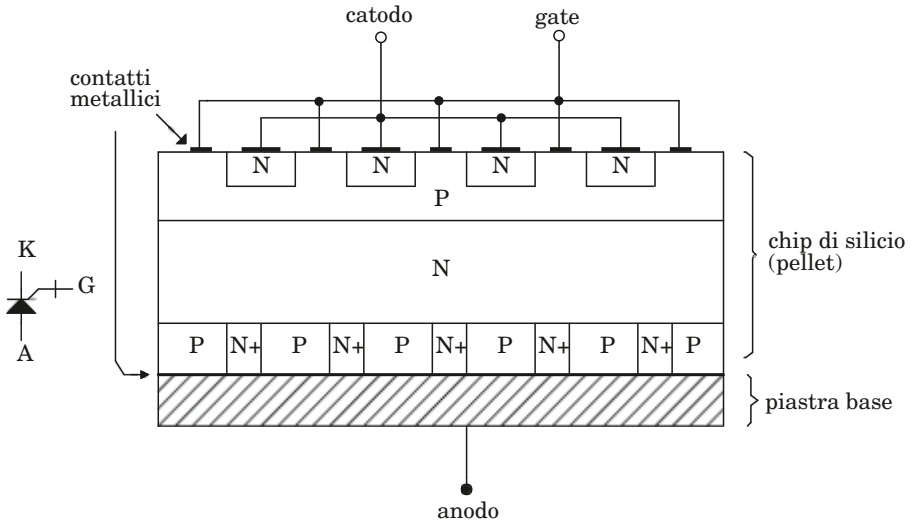


Fig. 3.33
Struttura tecnologica di un GTO asimmetrico.

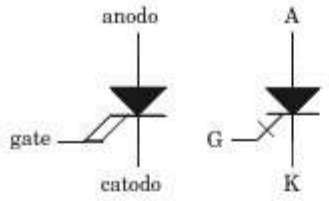


Fig. 3.34
Simboli grafici del GTO.

chip di un GTO la cui capacità di bloccaggio asimmetrico è ottenuta realizzando, dalla parte dell'anodo, delle interruzioni dello strato P, allo scopo di cortocircuitarlo, con i contatti metallici dell'anodo. La tensione di bloccaggio in senso inverso è inferiore a 20 V, per cui occorre munire il dispositivo di qualche sistema di protezione che impedisca di superare questo valore.

La ***figura 3.34*** mostra i simboli grafici del tiristore GTO. La ***figura 3.35*** mostra i valori parametrici che caratterizzano i GTO; alcuni tipi di GTO con contenitore a disco sono mostrati nella ***figura 3.36***.

I GTO sono utilizzati soprattutto nelle applicazioni in corrente continua, dove la caratteristica di spegnimento del dispositivo tramite l'elettrodo di controllo permette di realizzare circuiti più semplici perché non è necessario predisporre circuiti di disinnesco.

Part Number	V_{RRM}	V_{DRM}	$I_{T(RMS)}$	$I_{T(AV)}$	@ T_C	I_{TGQ}	I_{TSM} (1)		I^2t (1)		V_{TM} @ I_{TM} T_J = 25°C		I_{DM} I_{RM}	dv/dt	di/dt	t_{gt}	t_{gq}	I_{GT} (2)	V_{GT} (2)	T_J max	$R_{th(j-c)}$ (3)
							50Hz	60Hz	50Hz	60Hz											
	V	V	A	A	°C	A	A	A	kA²s	kA²s	V	A	mA	V/µs	A/µs	µs	µs	A	V	°C	K/W
IRKTS95-14	14	1400	90	55	66	300	750	785	2.7	2.5	3.00	180	20	600	200	4.0	10.0	0.5	1.0	125	0.320
IRKTS95-16	14	1600	90	55	66	300	750	785	2.7	2.5	3.00	180	20	600	200	4.0	10.0	0.5	1.0	125	0.320
81RDT100M	1000	1000	125	80	85	350	1500	1550	11.0	10.0	2.84	251	30	600	400	5.0	8.0	0.8	0.8	125	0.160
81RDT120M	1200	1200	125	80	85	350	1500	1550	11.0	10.0	2.84	251	30	600	400	5.0	8.0	0.8	0.8	125	0.160
81RDT140M	1400	1400	125	80	85	350	1100	1150	6.0	5.5	2.90	251	30	600	400	6.5	10.0	1.0	0.8	125	0.160
81RDT160M	1600	1600	125	80	85	350	1100	1150	6.0	5.5	2.90	251	30	600	400	6.5	10.0	1.0	0.8	125	0.160
84RDT100M	1000	1000	125	80	85	350	1500	1550	11.0	10.0	2.84	251	30	600	400	5.0	8.0	0.8	0.8	125	0.160
84RDT120M	1200	1200	125	80	85	350	1500	1550	11.0	10.0	2.84	251	30	600	400	5.0	8.0	0.8	0.8	125	0.160
84RDT140M	1400	1400	125	80	85	350	1100	1150	6.0	5.5	2.90	251	30	600	400	6.5	10.0	1.0	0.8	125	0.160
84RDT160M	1600	1600	125	80	85	350	1100	1150	6.0	5.5	2.90	251	30	600	400	6.5	10.0	1.0	0.8	125	0.160
100PET100	1000	1000	160	100	90	350	1100	1150	6.0	5.5	3.00	310	30	600	400	6.5	10.0	1.0	0.8	125	0.110
100PET120	1200	1200	160	100	90	350	1100	1150	6.0	5.5	3.00	310	30	600	400	6.5	10.0	1.0	0.8	125	0.110
100PET140	1400	1400	160	100	90	350	1100	1150	6.0	5.5	3.00	310	30	600	400	6.5	10.0	1.0	0.8	125	0.110
100PET160	1600	1600	160	100	90	350	1100	1150	6.0	5.5	3.00	310	30	600	400	6.5	10.0	1.0	0.8	125	0.110
150PFT200	2000	2000	235	150	81	800	2000	2100	20.0	18.0	3.20	471	80	1000	500	10.0	15.0	1.5	1.0	125	0.075
150PFT250	2500	2500	235	150	81	800	2000	2100	20.0	18.0	3.20	471	80	1000	500	10.0	15.0	1.5	1.0	125	0.075
160PFT100	1000	1000	250	160	88	600	2500	2600	31.0	28.5	2.70	503	50	1000	600	5.0	8.0	1.0	1.0	125	0.075
160PFT120	1200	1200	250	160	88	600	2500	2600	31.0	28.5	2.70	503	50	1000	600	5.0	8.0	1.0	1.0	125	0.075
160PFT140	1400	1400	250	160	88	600	2000	2100	20.0	18.0	3.15	503	50	1000	600	6.0	8.0	1.2	1.0	125	0.075
160PFT160	1600	1600	250	160	88	600	2000	2100	20.0	18.0	3.15	503	50	1000	600	6.0	8.0	1.2	1.0	125	0.075
160PFT100A	1000	1000	250	160	88	700	2500	2600	31.0	28.5	2.70	503	50	1000	600	5.0	8.0	1.0	1.0	125	0.075
160PFT120A	1200	1200	250	160	88	700	2500	2600	31.0	28.5	2.70	503	50	1000	600	5.0	8.0	1.0	1.0	125	0.075
160PFT140A	1400	1400	250	160	88	700	2000	2100	20.0	18.0	3.15	503	50	1000	600	6.0	8.0	1.2	1.0	125	0.075
160PFT160A	1600	1600	250	160	88	700	2000	2100	20.0	18.0	3.15	503	50	1000	600	6.0	8.0	1.2	1.0	125	0.075
160PFT100E	1000	1000	250	160	88	600	2000	2100	20.0	18.0	3.15	503	50	1000	600	6.0	8.0	1.2	1.0	125	0.063
160PFT120E	1200	1200	250	160	88	600	2000	2100	20.0	18.0	3.15	503	50	1000	600	6.0	8.0	1.2	1.0	125	0.063
160PFT140E	1400	1400	250	160	88	600	2000	2100	20.0	18.0	3.15	503	50	1000	600	6.0	8.0	1.2	1.0	125	0.063
160PFT160E	1600	1600	250	160	88	600	2000	2100	20.0	18.0	3.15	503	50	1000	600	6.0	8.0	1.2	1.0	125	0.063
320PJT200	2000	2000	500	320	80	1200	4000	4200	80.0	73.0	3.23	1000	100	1000	500	10.0	20.0	2.0	1.0	125	0.035
320PJT250	2500	2500	500	320	80	1200	4000	4200	80.0	73.0	3.23	1000	100	1000	500	10.0	20.0	2.0	1.0	125	0.035
320PJT200A	2000	2000	500	320	80	1400	4000	4200	80.0	73.0	3.23	1000	100	1000	500	10.0	20.0	2.0	1.0	125	0.035
320PJT250A	2500	2500	500	320	80	1400	4000	4200	80.0	73.0	3.23	1000	100	1000	500	10.0	20.0	2.0	1.0	125	0.035
350PJT100	1000	1000	550	350	80	1200	4500	4700	101.0	92.0	3.42	1100	80	1000	600	8.0	15.0	2.0	1.0	125	0.035
350PJT120	1200	1200	550	350	80	1200	4500	4700	101.0	92.0	3.42	1100	80	1000	600	8.0	15.0	2.0	1.0	125	0.035
350PJT140	1400	1400	550	350	80	1200	4500	4700	101.0	92.0	3.42	1100	80	1000	600	8.0	15.0	2.0	1.0	125	0.035
350PJT160	1600	1600	550	350	80	1200	4500	4700	101.0	92.0	3.42	1100	80	1000	600	8.0	15.0	2.0	1.0	125	0.035
350PJT100E	1000	1000	550	350	91	1200	4500	4700	101.0	92.0	3.00	1100	80	1000	600	8.0	15.0	2.0	1.0	125	0.035
350PJT120E	1200	1200	550	350	91	1200	4500	4700	101.0	92.0	3.00	1100	80	1000	600	8.0	15.0	2.0	1.0	125	0.035
350PJT140E	1400	1400	550	350	91	1200	4500	4700	101.0	92.0	3.00	1100	80	1000	600	8.0	15.0	2.0	1.0	125	0.035
350PJT160E	1600	1600	550	350	91	1200	4500	4700	101.0	92.0	3.00	1100	80	1000	600	8.0	15.0	2.0	1.0	125	0.035
350PBT200	18	2000	550	350	88	1000	6500	6800	211.0	193.0	2.40	1100	30	1000	500	10.0	20.0	2.0	1.0	125	0.045
350PBT250	18	2500	550	350	88	1000	6500	6800	211.0	193.0	2.40	1100	30	1000	500	10.0	20.0	2.0	1.0	125	0.045
550PMT200	18	2000	880	550	93	2000	11000	11500	605.0	550.0	2.70	1730	50	1000	350	10.0	23.0	3.0	1.0	125	0.022
550PMT250	18	2500	880	550	93	2000	11000	11500	605.0	550.0	2.70	1730	50	1000	350	10.0	23.0	3.0	1.0	125	0.022

Fig. 3.35
Parametri caratteristici dei GTO (*fonte*: Thompson Semiconductors).

Fig. 3.36
GTO racchiuso in un contenitore a disco.

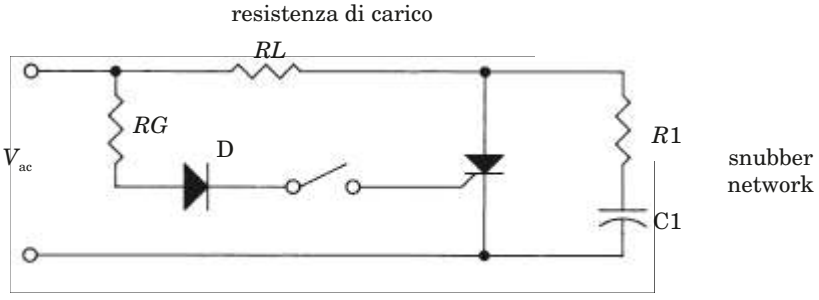
5 CIRCUITI APPLICATIVI DEI TIRISTORI

Il comando di innesco al terminale di gate dei tiristori può essere fornito in due modi diversi:
— in alternata a parzializzazione di fase;
— a impulsi.

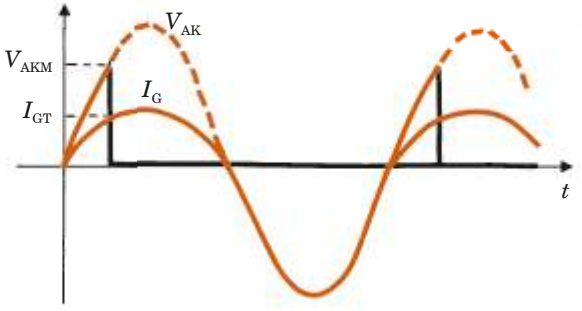
Circuiti in alternata a parzializzazione di fase e a impulsi

I circuiti di innesco a parzializzazione di fase sono realizzati quando sono alimentati in corrente alternata e si desidera ricavare la corrente di comando del gate dell'SCR dalla stessa rete di alimentazione.
Il modo più semplice per realizzare il circuito di innesco è quello mostrato nelle ***figure 3.37a***, ***b***, ***c***. La tensione e la corrente di gate, limitate dalla resistenza *RG*, aumentano durante la semionda positiva; quando la corrente raggiunge un valore tale da innescarlo, il circuito si porta nello stato on. Il diodo protegge il gate dell'SCR dalla tensione inversa durante la semionda negativa. Il valore della resistenza determina l'istante di innesco e quindi la corrente media nel carico; l'angolo di innesco può essere controllato fra 0° e 90°. Con questa configurazione circuitale l'istante di innesco non può essere determinato con precisione.

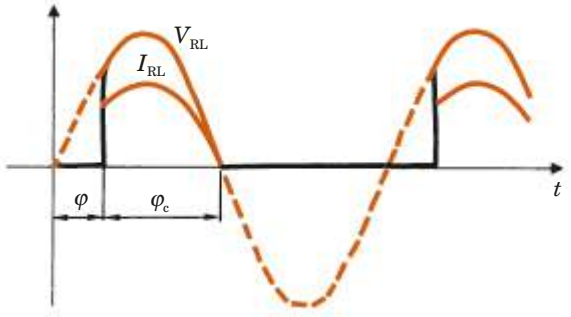
Figg. 3.37a, b, c
Circuito di innesco in alternata a ritardo di fase:
a. schema elettrico;
b. segnali di comando del tiristore;
c. segnali di uscita rilevati sul carico.



3.37a



3.37b



3.37c

La rete RC in parallelo al tiristore provvede a ridurre il rapporto d*V*/d*t* e a impedire che il dispositivo si autoinneschi. Il diodo D protegge la giunzione gate-catodo dalla tensione inversa applicata durante il semiperiodo negativo della tensione alternata di rete nel caso in cui essa sia superiore al valore massimo consentito.

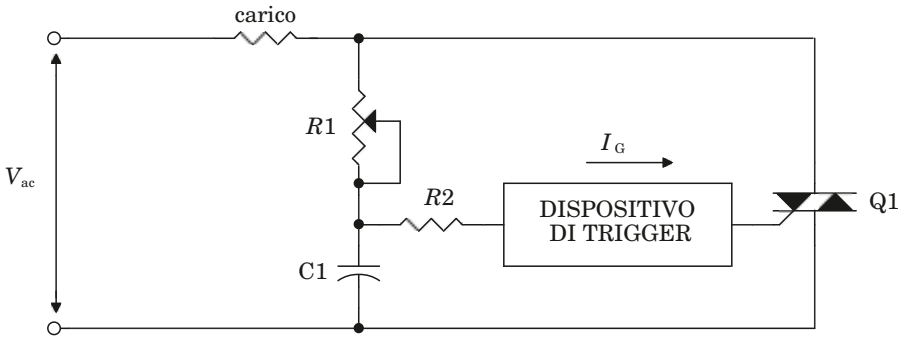
Negli schemi di controllo di carichi elettrici con il sistema a parzializzazione di fase, o del tipo on-off che impiegano SCR o Triac, per semplificare il circuito di innesco si ricorre a un dispositivo a soglia (*trigger*) che, normalmente interdetto, passa in conduzione quando ai suoi capi la ten-

sione supera un valore caratteristico. Tale funzione può essere ottenuta con dispositivi e configurazioni circuitali molto differenti.

Un **circuito di innesco a trigger** molto semplice si realizza connettendo in serie al gate del tiristore un certo numero di diodi o un diodo Zener di valore appropriato; se il controllo dev'essere bidirezionale si possono utilizzare diodi connessi in antiparallelo o due Zener in serie. La tensione ai capi dell'elemento di trigger (diodi o diodo Zener) non diminuisce dopo il raggiungimento della condizione di innesco, fatto che crea problemi nella regolazione delle condizioni di innesco quando questa viene affidata a una rete RC.

La ***figura 3.38*** mostra un circuito caratteristico che utilizza il sistema a parzializzazione di fase per controllare il trasferimento di potenza al carico: un **regolatore di intensità luminosa** (*light dimmer*). Il circuito di regolazione utilizza una sola costante di tempo realizzata con una rete R1-C1. Il valore della resistenza R1 dev'essere piuttosto elevato affinché il

Fig. 3.38
Regolatore di luminosità con ritardo di innesco controllato mediante l'effetto ritardatore della carica di un condensatore.



sistema possa ottenere il minimo ritardo di innesco di minima luminosità (≅10 ms); la corrente di innesco potrebbe non essere tale da garantire l'innesco del circuito. Per generare l'impulso si sfrutta allora la quantità di carica accumulata nel condensatore C1, utilizzando dei dispositivi di trigger che, una volta superata la tensione di soglia, riducono la propria resistenza interna consentendo di ridurre la tensione ai loro capi. Tale variazione di tensione dV ai capi del dispositivo di trigger, e quindi del condensatore, comporta il passaggio di un impulso di corrente di ampiezza

$$i = C\frac{dV}{dt} \qquad 3.2$$

dove:

dt dipende dalla velocità di innesco del dispositivo di trigger utilizzato

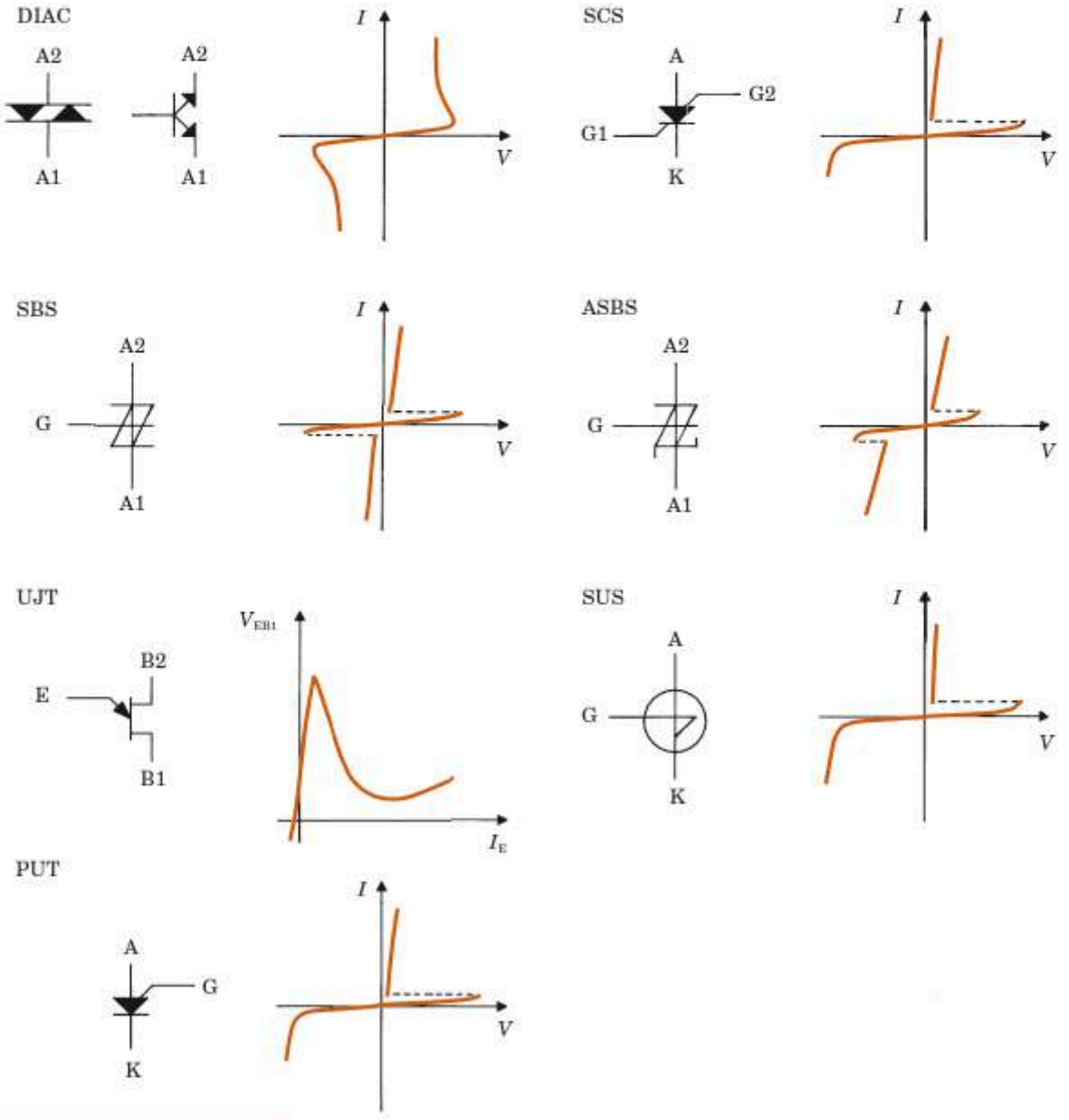
SBS
– Silicon bilateral switch
PUT
– Programmable unijunction transistor
ASBS
– Asymmetrical SBS
SUS
– Silicon unilateral switch

Fra i molti dispositivi a semiconduttore che presentano una caratteristica di innesco con riduzione della tensione, per il comando dei tiristori si usano (▸ ***Fig. 3.39***): il DIAC, l'**SBS**, il transistor unigiunzione (UJT), il **PUT**, l'SCS, l'**ASBS**, il **SUS**. Il dispositivo più utilizzato è il Diac in quanto la sua caratteristica di innesco è simmetrica e il suo costo relativamente basso.

Il circuito delle ***figure 3.40a***, ***b*** funziona con lo stesso principio del circuito della figura 3.39, ma utilizza un Diac per stabilire con precisione la soglia di innesco dell'SCR. Finché la tensione ai capi del con-

densatore rimane al di sotto della tensione di breakover del Diac, nel gate dell'SCR non circola corrente e lo stesso accade nello stato off. Quando la tensione supera il valore di breakover e il Diac entra in conduzione, nel gate viene iniettata una corrente tale da innescare l'SCR. Quando la tensione viene invertita o, meglio, quando la tensione scende al di sotto di quella di mantenimento, l'SCR si interdice. La tensione sul condensatore aumenta con la stessa legge sinusoidale del segnale di ingresso, ma con uno sfasamento che può teoricamente variare fra 0° e 90°. Lo sfasamento della rete RC e, quindi, l'angolo di accensione θ, possono essere regolati variando il valore della resistenza con il potenziometro $R2$. L'angolo supplementare θ_c viene detto **angolo di conduzione**.

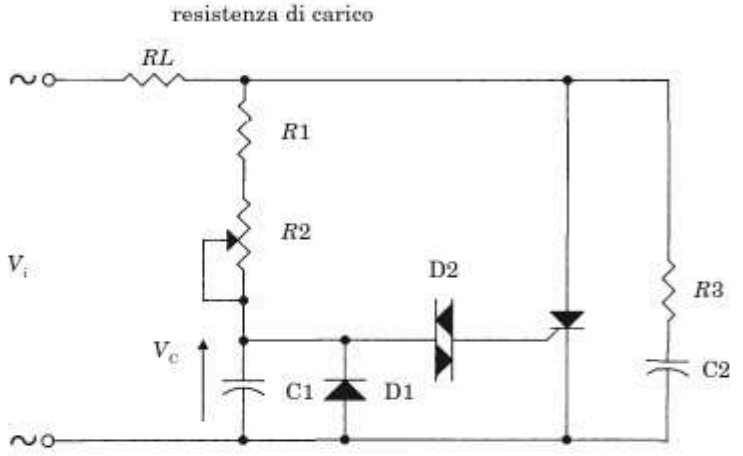
Fig. 3.39
Curve caratteristiche e simboli grafici dei più comuni dispositivi di trigger dei tiristori.



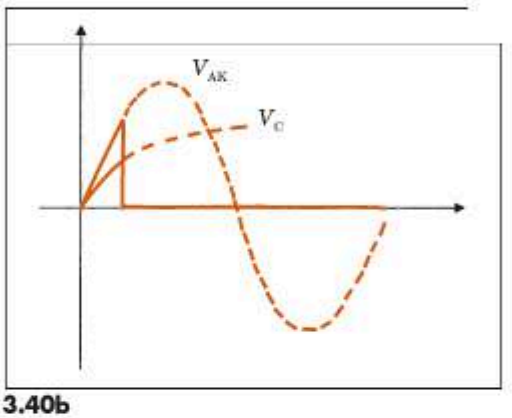
Le ***figure 3.41a, b*** mostrano lo schema di un variatore di luce realizzato con la configurazione circuitale descritta.

I circuiti che utilizzano come elemento di trigger il Diac possono essere efficacemente sostituiti da altri basati su dispositivi che permettono una migliore regolazione della soglia di innesco, una maggiore corrente di innesco e una maggiore adattabilità alle particolari condizioni di innesco richieste da alcuni tiristori (▸ ***Fig. 3.42***). Un'alternativa al Diac è l'SBS, che presenta una tensione di innesco (≅ 9 ÷ 18 V) più bassa di quella del Diac (28 ÷ 39 V) e una caduta di tensione nello stato di conduzione (*on-state*) decisamente minore (≅ 2 V) rispetto a quella del Diac (≅ 26 V). L'SBS ha quindi una soglia d'innesco più bassa che permette, a parità di capa-

Figg. 3.40a, b
Circuito di comando di un SCR in alternata a ritardo di fase ottenuto mediante una rete *RC* e un Diac:
a. schema elettrico;
b. forme d'onda.

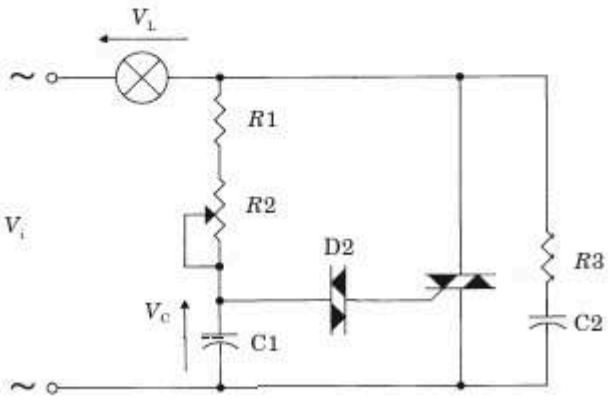


3.40a

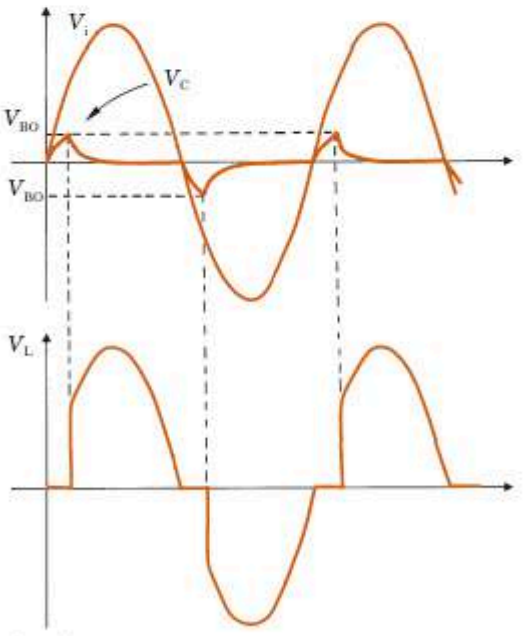


3.40b

Figg. 3.41a, b
Variatore di luminosità con Triac:
a. schema elettrico;
b. forme d'onda.



3.41a



3.41b

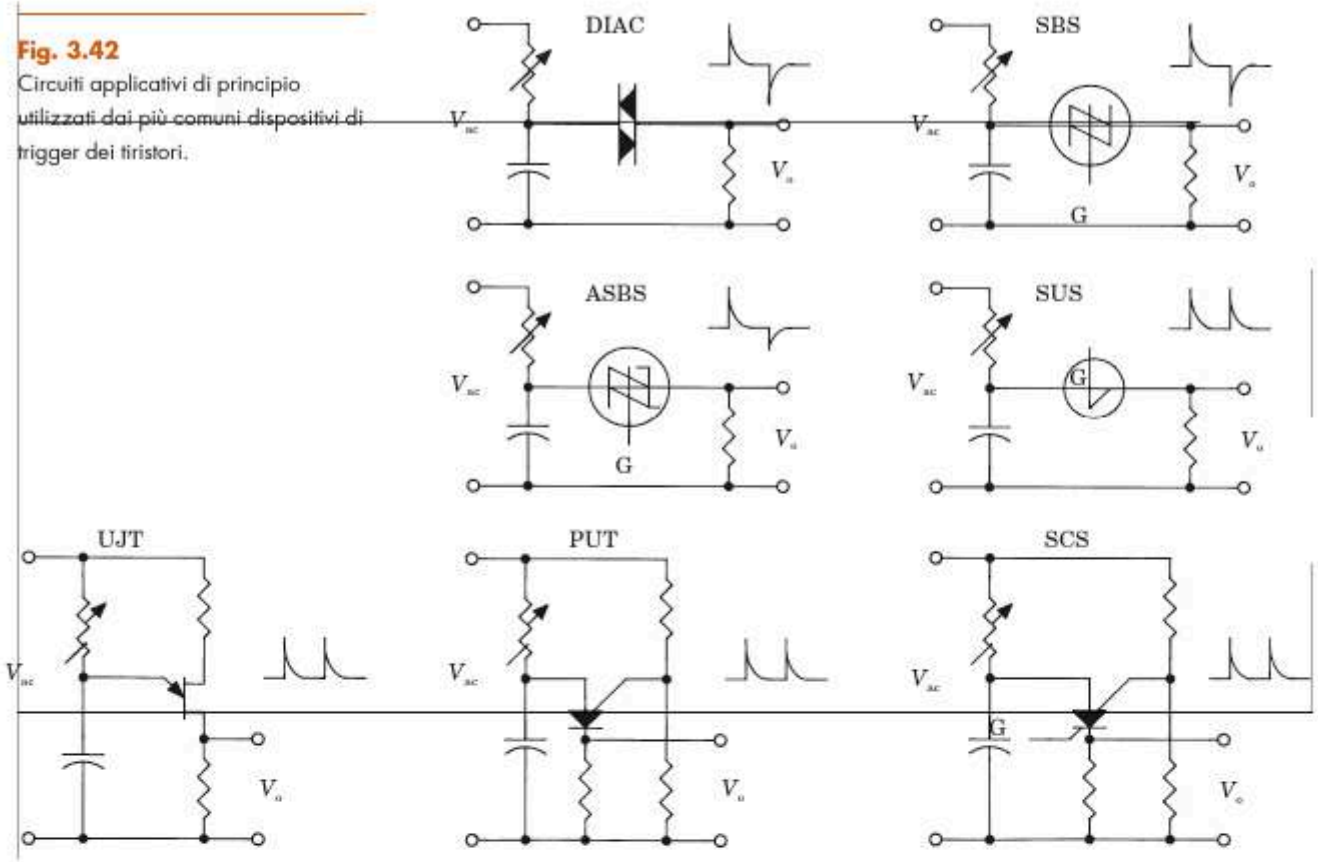


Fig. 3.42
Circuiti applicativi di principio utilizzati dai più comuni dispositivi di trigger dei tiristori.

cità, di utilizzare valori di $R1$ più elevati e ottenere costanti di tempo più grandi; dalla consistente variazione dV fra tensione di innesco e tensione di conduzione deriva una maggiore corrente di innesco.

Nella ***tabella 3.2*** sono messe a confronto le principali caratteristiche dei dispositivi di trigger più comuni.

Tabella 3.2 Confronto dei parametri caratteristici dei più comuni dispositivi di trigger dei tiristori

TRIGGER	TENSIONE DI SOGLIA V_{BO} (V)	CORRENTE DI SOGLIA I_{BH} (μA)	CORRENTE DI HOLDING I_H (A)	NOTE
N. diodi in serie	n × 0,6	> 50	0,1 ÷ 100	circuito complesso
Diodo Zener	3,3 ÷ 100	> 500	1 ÷ 20	I_{TH} elevata
DIAC	24 ÷ 39	2 ÷ 50	1 ÷ 100	R_{ON} elevata
SIDAC	100 ÷ 270	1 ÷ 100	10 ÷ 100	R_{ON} elevata
SBS	6 ÷ 100	50 ÷ 500	0,1 ÷ 0,5	R_{ON} bassa
UJT	4 ÷ 35	1 ÷ 5	1 ÷ 10	regolabile
PUT	2 ÷ 50	0,1 ÷ 5	1 ÷ 20	regolabile
SCS	5 ÷ 35	0,1 ÷ 10	1 ÷ 50	regolabile
ABSC	7 ÷ 20	2 ÷ 50	1 ÷ 100	R_{ON} media

Il circuito che genera l'impulso è autonomo rispetto a quello controllato dal tiristore; in caso di funzionamento in alternata deve essere sincronizzato con il passaggio al valore nullo della tensione di rete.

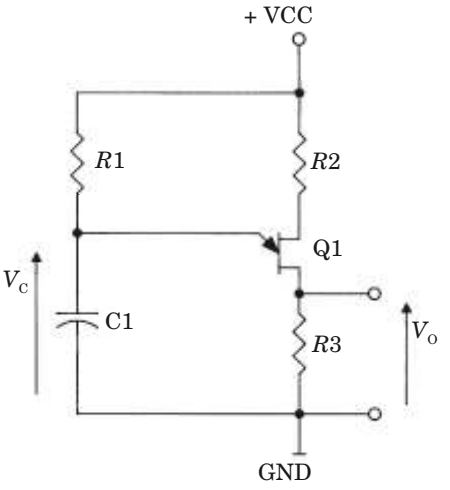
Le ***figure 3.43a***, ***b*** mostrano un circuito di innesco molto comune che utilizza, come elemento attivo, il transistor unigiunzione (UJT), un dispositivo elettronico che abbiamo già esaminato (▸ ***Vol. 2, Mod. 2, Cap. 4***). Le ***figure 3.44a***, ***b*** presentano il simbolo grafico, il circuito equivalente e la caratteristica corrente-tensione.

Finché la tensione applicata all'emettitore è minore del valore di picco il diodo D è interdetto, non circola corrente di emettitore e la tensione misurata sulla resistenza $R3$ è pari al rapporto di partizione fra le resistenze. Quando la tensione sull'emettitore, per effetto dell'aumento di tensione sul condensatore che si sta caricando, supera la tensione di picco, il diodo entra in conduzione e la resistenza di interbase $RB1$ diminuisce rapidamente il suo valore e scarica il condensatore sulla resistenza $R3$. Il picco di tensione che si rileva sulla resistenza $R3$ può essere utilizzato per pilotare un SCR. Variando la costante di tempo di carica del condensatore si può regolare l'istante di innesco e, dimensionando opportunamente la resistenza $R3$, si possono regolare l'ampiezza e la durata dell'impulso.

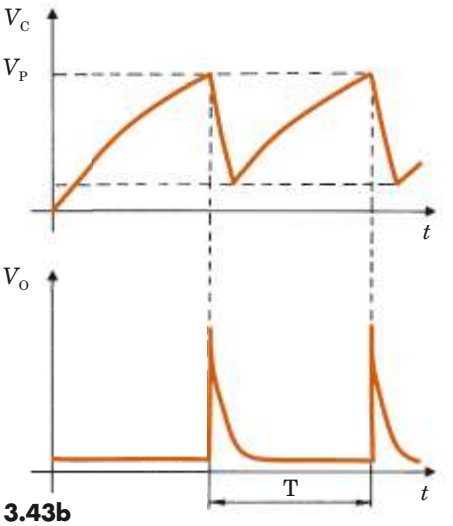
Figg. 3.43a, b:
a. generatore di impulsi con UJT;
b. forme d'onda.

$$f = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{1}{\quad}$$

dove η rappresenta il rapporto intrinseco.

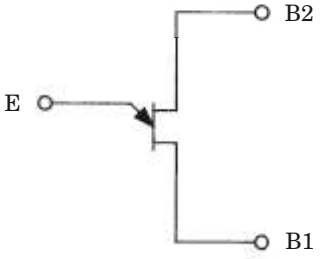


3.43a

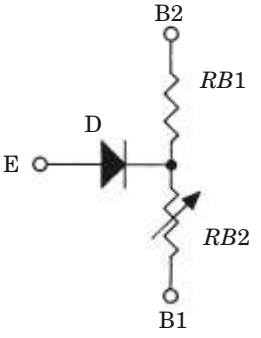


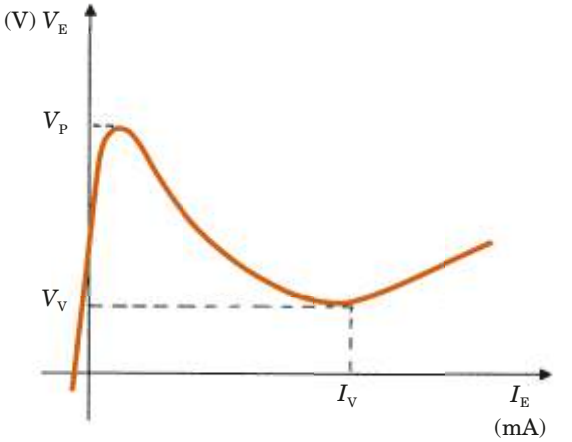
3.43b

Figg. 3.44a, b
Transistor UJT:
a. struttura e simbolo grafico;
b. caratteristica d'ingresso.



3.44a





3.44b

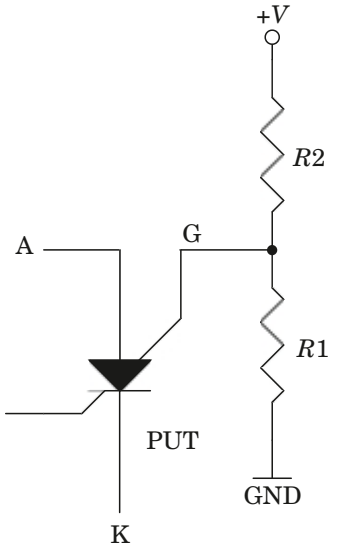


Fig. 3.45
Simbolo grafico di un PUT e circuito di polarizzazione.

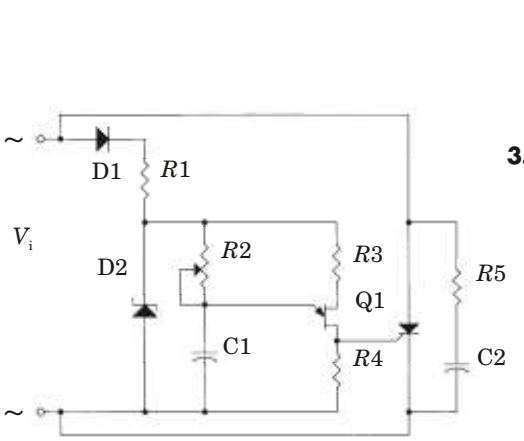
La frequenza degli impulsi generati dal circuito dipende dal rapporto intrinseco che caratterizza il transistor unigiunzione, per cui in molte applicazioni quest'ultimo può essere utilmente sostituito con un nuovo dispositivo, il PUT, che permette di regolare il rapporto intrinseco mediante un partitore resistivo esterno (▸ ***Fig. 3.45***).

Per essere utilizzato in corrente alternata, il circuito mostrato richiede l'aggiunta di alcuni elementi capaci di sincronizzare la generazione degli impulsi con la tensione di rete.

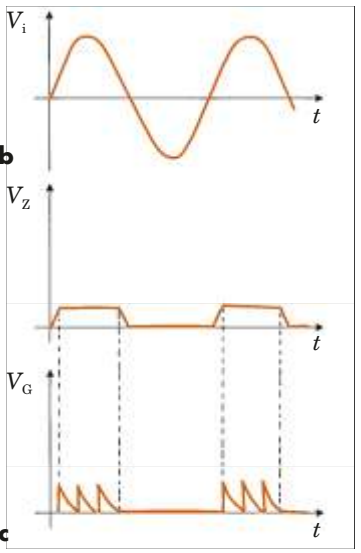
Il circuito mostrato nelle ***figure 3.46a***, ***b***, ***c*** provvede, con il diodo D1, a eliminare dalla tensione di rete la semionda negativa e a ricavare dalla tensione pulsante risultante una tensione trapezoidale di livello adeguato al comando dell'oscillatore. Poiché manca la tensione di alimentazione, l'oscillazione rimane sospesa durante la semionda negativa e riprende ogniqualvolta viene applicata quella positiva: in questo modo, in tutte le semionde positive viene generata la stessa sequenza di impulsi. Agendo sulla resistenza $R2$ si modifica la frequenza degli impulsi, e quindi l'angolo della fase di innesco e il suo angolo supplementare: l'angolo di conduzione.

Se questo circuito viene utilizzato per pilotare un Triac invece che un SCR, il circuito generatore degli impulsi di innesco dev'essere isolato dal tiristore perché gli impulsi devono essere inviati in entrambe le

Figg. 3.46a, b, c:
a. generatore di impulsi con UJT sincronizzato con la tensione di rete;
b. tensione di rete;
c. impulsi di comando.



3.46a



3.46b

3.46c

semionde (▸ ***Figg. 3.47a, b***). Il ponte a onda intera D1 provvede a generare una tensione pulsante a 100 Hz, ricavata dalla tensione di rete. L'isolamento può essere ottenuto con un trasformatore di impulsi oppure con un fotoaccoppiatore a fototriac (serie MOC della Motorola).

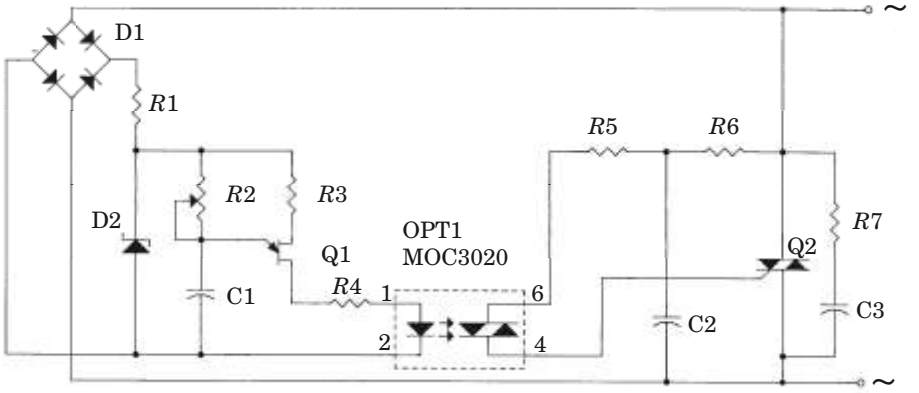
Il sistema a parzializzazione di fase presenta rapidi fronti d'onda della tensione sul carico, con conseguente produzione di armoniche (**ANALISI DI FOURIER**) che possono disturbare le apparecchiature radio-TV eventualmente presenti. I limiti ai radiodisturbi e alle perturbazioni che si possono introdurre nelle reti elettriche di alimentazione sono fissati da precise norme internazionali (CISPR) e da norme nazionali (per l'Italia la CEI 77-1, che traduce la norma europea EN 50006). Le perturbazioni introdotte da apparecchiature che utilizzano controlli elettronici incrementano la pre-

ANALISI DI FOURIER
– Analisi matematica che attraverso l'applicazione del principio di Fourier permette di scomporre una qualsiasi forma d'onda periodica in onde sinusoidali costituite da una frequenza fondamentale e da una serie di armoniche con frequenze multiple di quella fondamentale

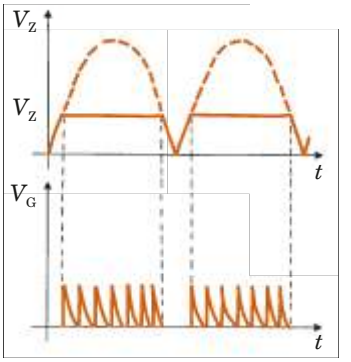
senza di armoniche e di fluttuazioni di tensione nelle reti di distribuzione elettrica a bassa tensione; in un impianto di illuminazione il fenomeno viene evidenziato dallo sfarfallamento della luce.

Una tecnica di regolazione di potenza, alternativa a quella di fase, che permette di eliminare i disturbi senza ricorrere a filtri costosi è quella **a controllo di zero tensione** o **a treno d'onde**. Con questa tecnica si fa in modo che il circuito venga chiuso nell'istante in cui la tensione passa per lo zero e venga aperto nell'istante in cui la corrente passa per lo zero. La condizione

Figg. 3.47a, b:
a. circuito di generazione degli impulsi di ingresso per il pilotaggio di un Triac alimentato dalla tensione di rete;
b. forme d'onda.



3.47a



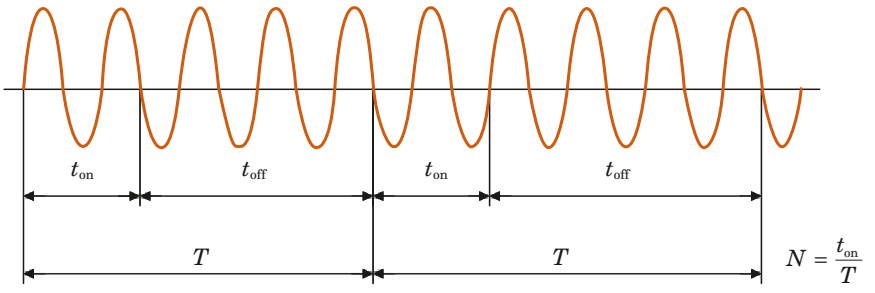
3.47b

di spegnimento del tiristore con corrente nulla avviene sempre, in quanto è intrinseca al suo principio di funzionamento; l'entrata in conduzione nell'istante in cui la tensione è nulla viene ottenuta generando gli impulsi di innesco con circuiti integrati dedicati. Il trasferimento di potenza al carico avviene (▸ ***Fig. 3.48***) in modo proporzionale al numero di periodi di conduzione.

Nel campo del **controllo di fase** per il comando dei tiristori sono disponibili: i TDA1085, 1185, 1285 della Motorola, l'L120 della SGS, l'U210 e l'U211 della Telefunken ecc. Descriveremo in seguito (▸ ***Mod. D, cap. 44***), quando parleremo del controllo dei motori in corrente continua e in corrente alternata, alcuni di questi circuiti integrati.

Fig. 3.48
Comportamento della corrente in un sistema di controllo "a treno d'onda".

N numero di periodi di conduzione



PER FISSARE I CONCETTI

1. Che cosa distingue un Triac da un SCR?
2. Descrivi il principio di funzionamento di un GTO.
3. Disegna e descrivi un circuito di controllo a parzializzazione di fase.
4. Che cos'è l'angolo di conduzione?

SINTESI DEL MODULO B

CAPITOLO 2

La maggior parte delle apparecchiature elettroniche è composta da due sezioni funzionali: una **sezione di controllo** che, dopo avere ricevuto i segnali di ingresso, elabora e invia i comandi, e una **sezione di potenza** che controlla il trasferimento di potenza dal generatore al carico. I circuiti di potenza si suddividono in due classi: gli amplificatori e i regolatori di potenza.

— Gli **amplificatori di potenza** forniscono al carico un segnale avente la stessa forma di quello in ingresso (non distorta) ma di potenza maggiore. Vengono valutati in base al **rendimento** η e alla **figura di merito** F.

— Gli amplificatori di potenza sono classificati in cinque gruppi: A, B, AB, C, D, ciascuno dei quali presenta differenti valori di rendimento e di figure di merito, e riproduce, più o meno fedelmente, la forma d'onda d'ingresso.

— Il transistor bipolare può operare in **zona di interdizione** (corrente pressoché nulla e caduta di tensione elevata), in **zona lineare** (a uguali variazioni di tensione si hanno uguali variazioni di corrente), in **zona di saturazione** (corrente elevata, caduta di tensione bassa). Quando viene utilizzato come elemento di commutazione, il transistor commuta fra uno stato scelto nella zona di interdizione (circuito aperto) e uno stato scelto nella zona di saturazione (circuito chiuso).

Quando un transistor viene utilizzato per commutare un carico induttivo esiste la possibilità che si generi sul suo collettore, a causa dell'energia accumulata dall'induttanza, un'extratensione che lo potrebbe danneggiare. Infatti quando il transistor si interdice, la corrente di saturazione che percorre l'induttanza non si annulla istantaneamente e non può circolare nel transistor stesso. Il circuito deve allora prevedere la presenza, in parallelo all'induttanza, di una resistenza di smorzamento (di basso valore) che riduca la caduta di tensione sul collettore del transistor.

La presenza della resistenza di basso valore non è però necessaria durante il normale funzionamento e genera, quando il transistor è in conduzione, una forte dissipazione di potenza e richiede un sovradimensionamento del componente e quindi un maggior costo. In pratica, il problema si risolve inserendo nel circuito non un resistore ma un diodo polarizzato inversamente, quando il transistor è in saturazione, e direttamente quando lo stesso è interdetto. Il diodo in questo caso provvede a fornire alla corrente generata dall'induttanza un percorso a bassa resistenza mentre, quando il transistor si trova in piena conduzione, presenta una resistenza di alto valore e quindi non influenza il comportamento del circuito stesso. Il passaggio dallo stato di conduzione a quello di saturazione non è istantaneo (i fronti di salita e di discesa non sono nulli). Durante la commutazione il transistor dovrà dissipare una notevole potenza per intervalli di tempo finito a causa di valori di corrente e di tensione significativi.

Nel dimensionamento del transistor occorre tenere conto anche degli aspetti termici, valutando la tensione raggiunta dalle giunzioni, che non possono superare il valore massimo ammesso. Se questo avviene si possono fare due scelte progettuali: 1) si può facilitare lo smaltimento del calore e ridurre la resistenza termica giunzione-ambiente del transistor (R_{thja} montandolo su un dissipatore di calore; 2) si può scegliere un altro transistor di potenza con un valore di resistenza termica giunzione-ambiente adatto.

Un circuito di commutazione si può avvalere anche di un transistor NMOS a riempimento (*enhancement*). In questo caso, quando la tensione applicata al gate è nulla ($V_g = 0$) il canale non esiste, non vi è corrente: il circuito si comporta dal punto di vista elettrico come un condensatore (C_{off}) e i terminali di drain e source sono isolati l'uno dall'altro, separati da un dielettrico. Quando la tensione applicata al gate supera la tensione di soglia si ha la formazione del canale e il transistor si comporta come un interruttore chiuso con resistenza pari a $R_{DS(ON)}$. Questa resistenza fa sì che la tensione fra drain e source sia proporzionale alla corrente che vi scorre: è quindi necessario utilizzare transistor con bassi valori di resistenza $R_{DS(ON)}$.

— La commutazione del transistor, come nei bipolari, avviene in **tempi finiti**: $t_{d(on)}$ misura il tempo necessario per creare il canale conduttivo; $t_{d(off)}$ misura il tempo necessario per svuotare il canale conduttivo. I tempi di commutazione del transistor NMOS devono essere i più bassi possibile.

— Quando è impiegato per commutare carichi induttivi, il transistor MOS subisce un degrado del comportamento e dell'affidabilità a causa dell'aumento della dissipazione di potenza e della corrispondente crescita della temperatura di giunzione. Quest'ultima fa aumentare il valore della resistenza di conduzione $R_{DS(ON)}$ e quindi anche quello della dissipazione, causando la riduzione del tempo di vita utile del transistor. Per arginare il fenomeno, di regola si aggiunge una rete RC che riduce le perdite di commutazione all'interdizione.

— Quando il carico è collegato verso massa e il transistor è in chiuso (in **conduzione piena**), il terminale di source e quello del carico hanno lo stesso potenziale dell'alimentazione. La tensione positiva sul gate rispetto al source, che è derivata dalla tensione di alimentazione, tende ad assumere valori talmente bassi da riaprire il transistor MOSFET; in questa situazione, per mantenere quest'ultimo in conduzione occorre una tensione di gate più elevata di quella di alimentazione, e questo può essere ottenuto con il cosiddetto **circuito di bootstrap**, costituito da un diodo e da un condensatore.

CAPITOLO 3

I **tiristori** sono una famiglia dei componenti di silicio che in condizioni operative normali sono in stato di interdizione (**circuito aperto**) ma, per effetto di un comando o al raggiungimento di un'adeguata differenza di potenziale applicata ai loro capi, possono andare in conduzione (**circuito chiuso**) sopportando correnti elevate con basse

cadute di tensione. I principali dispositivi di questa famiglia sono: l'SCR, il Diac, il Triac, il GTO.

— Il **rettificatore controllato al silicio** (SCR) è un componente a semiconduttore con una struttura P-N-P-N. Possiede tre terminali: un **anodo**, un **catodo** e un **gate** che controlla la conduzione del circuito. Una volta innescato, il dispositivo resta in conduzione finché la tensione anodo catodo non si annulla o si inverte.

Il **Diac** è un diodo bidirezionale formato da due strutture P-N-P-N in parallelo. È un dispositivo che può andare in conduzione solo se la tensione di polarizzazione diretta e/o inversa supera il valore di **breakover** (V_{BO}).

Il **Triac** è un componente semiconduttore che riunisce due strutture P-N-P-N in antiparallelo. I due terminali collegati agli estremi della struttura sono detti **terminali principali** o **anodi** e sono indicati con le sigle A1 (MT1) e A2 (MT2); il terminale di controllo è chiamato **gate G**.

— Il Triac funziona come un SCR, con la differenza che può essere portato in conduzione in entrambe le direzioni da un segnale di innesco applicato al terminale di gate positivo o negativo in funzione del verso della tensione applicata sugli anodi. Una corrente di valore e durata dati riduce il valore della tensione di breakover e permette al dispositivo di entrare in conduzione. Una volta innescato, il Triac resta in conduzione finché la corrente scende sotto il **valore di mantenimento** o la tensione applicata fra i terminali principali si annulla o si inverte.

Il **GTO** è un tiristore che può essere portato in conduzione o in interdizione tramite un opportuno comando applicato al **terminale di gate**. Ha un funzionamento di tipo unidirezionale: può essere posto in conduzione per il superamento della tensione breakover o con il comando di gate, e può essere posto in interdizione con l'inversione della tensione di alimentazione, con la diminuzione della corrente anodica al di sotto del valore di mantenimento o con il comando di gate.

I **tiristori** sono caratterizzati da elevata velocità di commutazione, buon rendimento, ottima affidabilità, vita elettrica lunga, notevole compattezza meccanica, totale assenza di rimbalzi e archi voltaici. Hanno lo svantaggio di presentare, nello stato di non conduzione, una **corrente di perdita** rilevante (qualche decina di milliampere) e di essere sensibili ai transitori di tensione presenti sulla rete che, se non prevenuti, possono portare all'**autoinnesco** del tiristore. Quando sono percorsi da forti correnti determinano un'alta **dissipazione di potenza**: è quindi necessario un attento dimensionamento del dissipatore di calore, che deve garantire il non superamento della temperatura massima raggiungibile dalla giunzione.

Il comando di innesco al terminale di gate dei tiristori può essere fornito in due modi diversi: in alternata a parzializzazione di fase o a impulsi.

I circuiti di innesco a parzializzazione di fase sono realizzati quando sono alimentati in corrente alternata e si desidera ricavare la corrente di comando del gate dell'SCR dalla stessa rete di alimentazione. Negli schemi di controllo di carichi elettrici con il sistema a parzializzazione di fase, o del tipo on-off che impiegano SCR o Triac, per semplificare il circuito di innesco si ricorre a un dispositivo a soglia (trigger) che, normalmente interdetto, passa in conduzione quando ai suoi capi la tensione supera un valore caratteristico.

Il circuito di innesco a impulsi è autonomo rispetto a quello controllato dal tiristore, in caso di funzionamento in alternata deve essere sincronizzato con il passaggio al valore nullo della tensione di rete. Un circuito di innesco comune utilizza come elemento attivo il transistor unigiunzione.

VERIFICHE

1.
Quali sono le principali caratteristiche elettriche che caratterizzano il comportamento di un transistor bipolare in commutazione?

2.
La commutazione di un carico fortemente induttivo da parte di un transistor bipolare pone in primo piano alcune problematiche di progetto e di dimensionamento. Quali? Come vengono risolte?

3.
Quali sono i principali tipi di tiristori? Descrivi brevemente il loro principio di funzionamento.

4.
Quali sono i principali parametri elettrici statici e dinamici dell'SCR?

5.
I tiristori possono essere soggetti al fenomeno dell'autoinnesco. Di che cosa si tratta? Come può essere controllato?

6.
Quali sono le condizioni di innesco di un SCR?

7.
Le condizioni di innesco di un Triac variano in funzione del verso, positivo e negativo, dell'impulso di corrente fornito al terminale di gate. Qual è la condizione che innesca più rapidamente il Triac e perché?

8.
Quali vantaggi offre un GTO rispetto a un SCR?

9.
Descrivi il principio di funzionamento di un circuito di innesco a parzializzazione di fase.

10.
Descrivi due dispositivi a soglia, a tua scelta, utilizzati per generare gli impulsi di comando di un tiristore.

MODULO

C

Dispositivi optoelettronici

CAP 4

FOTOEMETTITORI

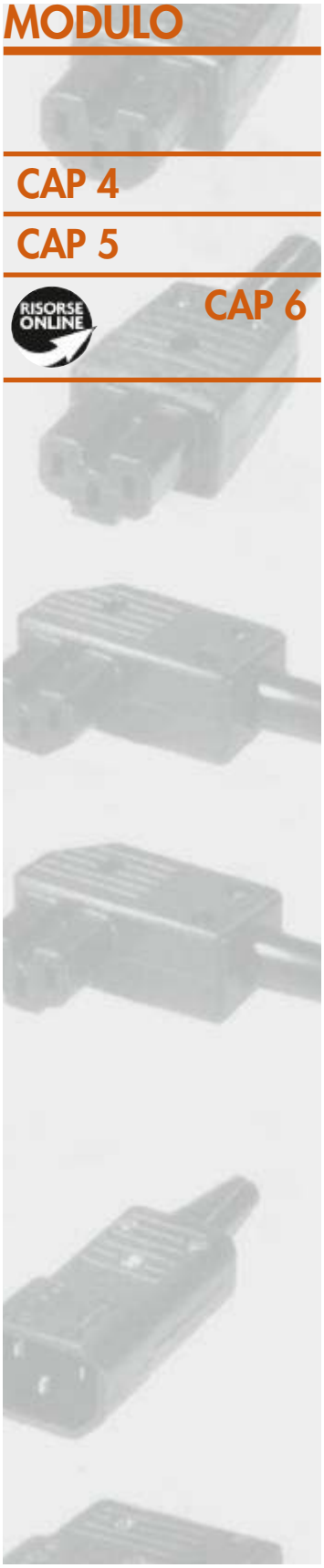
CAP 5

FOTORIVELATORI

RISORSE ONLINE

CAP 6

SISTEMI PER LA TRASMISSIONE DEI SEGNALI



Prerequisiti

- Concetti fondamentali della teoria quantistica della materia.
- Meccanismi di conduzione elettrica nei materiali semiconduttori.
- Meccanismi di funzionamento di una giunzione PN.
- Effetto di una polarizzazione diretta e inversa di una giunzione PN.
- Comportamento statico e dinamico di una giunzione PN.
- Principali dispositivi elettronici discreti a semiconduttore.

Obiettivi

Conoscenze

- Funzionamento dei principali dispositivi emettitori e ricevitori.
- Caratteristiche elettriche, meccaniche e ottiche dei dispositivi optoelettronici.
- Principali tecnologie di fabbricazione dei dispositivi optoelettronici.
- Valutazione dei diversi mezzi di trasmissione.

Competenze

- Saper scegliere e dimensionare correttamente i dispositivi optoelettronici.
- Saper utilizzare il componente optoelettronico più adatto a una data applicazione in base ai suoi parametri caratteristici.
- Saper scegliere il canale di comunicazione più adatto in base alle caratteristiche dell'apparecchiatura elettronica che si intende realizzare.

CAP 4

FOTOEMETTITORI

Concetti chiave

- Eterogiunzione
- Inversione di popolazione
- Lunghezza d'onda
- Laser

1 Diodi led

RISORSE ONLINE *Realizzazione tecnologica dei diodi led*

2 Display

3 Visualizzatori a scarica

4 Diodi laser

RISORSE ONLINE *Tecnologie costruttive dei diodi laser a semiconduttore*

I componenti optoelettronici sono dispositivi che possono interagire con onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda compresa fra l'infrarosso e l'ultravioletto. Quando generano un'onda elettromagnetica, cioè convertono l'energia elettrica in una radiazione luminosa, vengono definiti dispositivi **optoelettronici emettitori**. Appartengono a questo gruppo: i diodi **LED** e **LASER**, e i dispositivi a cristalli liquidi.

Un dispositivo optoelettronico viene definito **rivelatore** quando l'onda elettromagnetica ne modifica il comportamento elettrico. Appartengono a questo gruppo: le celle fotovoltaiche, i fotodiodi, i fototransistor, i fotodarlington, i fototiristori (fotoscr, fototriac). Parleremo di questi dispositivi nel ***capitolo 5***.

LED
– Light emitting diode
LASER
– Light amplification by stimulated emission of radiation

1 DIODI LED

I diodi emettitori di luce, o led, hanno la proprietà di emettere una radiazione luminosa quando la loro polarizzazione diretta produce il fenomeno della ricombinazione delle cariche elettriche. Le radiazioni emesse dai diodi si collocano nello spettro visibile **(VLED)** e nella banda dell'infrarosso **(IRED)**.

VLED
– Visible led
IRED
– Infrared emitter diode

L'occhio umano presenta la massima sensibilità alla lunghezza d'onda di 0,555 μm, mentre la sua sensibilità si riduce a zero alle lunghezze d'onda inferiori a 0,39 μm e superiori a 0,77 μm. Affinché l'occhio umano possa rilevarne l'emissione luminosa, il led deve emettere un'energia della luce superiore a $h\upsilon \geq 1{,}8$ eV (a 0,7 μm).

Lo spettro di emissione, cioè il **colore della radiazione emessa**, dipende dal materiale di cui è composto il diodo: vengono prodotti diodi led rossi, verdi, gialli, azzurri, arancio, blu, bianchi. I diodi IRED sono largamente utilizzati nel campo della comunicazione dei dati, nei sistemi di controllo e nei fotaccoppiatori.

Principio di funzionamento

La generazione di una coppia elettrone-lacuna in un materiale semiconduttore può avvenire per effetto dell'energia fornita da una radiazione luminosa di opportuna lunghezza d'onda (visibile o infrarosso) che permette all'elettrone presente nella banda di valenza di saltare nella banda di conduzione. Nel processo di ricombinazione di un elettrone e di una lacuna, l'elettrone passa dalla banda di conduzione alla banda di valenza emettendo energia sotto forma di calore (**fononi**), che viene assorbito e disperso dal cristallo, oppure sotto forma di una radiazione luminosa (**fotoni**). Quando un diodo led viene polarizzato direttamente, gli elettroni e le lacune sono iniettate, rispettivamente, nelle

zone P e N, dove si ricombinano con le cariche maggioritarie presenti; quanto più la corrente è elevata, tanto maggiori sono i ritmi di ricombinazione degli elettroni e delle lacune, e quindi l'intensità della radiazione emessa.

La radiazione è prodotta dalla ricombinazione diretta fra le bande di conduzione e di valenza, o da transizioni dei portatori di carica fra i livelli di energia intermedi, come quelli degli atomi donatori e accettori, presenti nella banda interdetta. La possibilità che un processo di ricombinazione emetta una radiazione luminosa (fotoni) dipende dal materiale utilizzato, che può essere del tipo **diretto** (fenomeno di ricombinazione diretto) o **indiretto** (fenomeno di ricombinazione indiretto).

Nelle **transizioni dirette** fra bande diverse si devono conservare le quantità di moto p dell'elettrone (o del cosiddetto vettore d'onda, definito come $k = p/\hbar$, dove $\hbar$ è la costante di Planck divisa per 2π) oltre che l'energia del sistema (▸ ***Vol. 1, Mod. A, Cap. 1***, scaricabile dal sito Internet).

Le **transizioni indirette**, invece, avvengono in modo più complesso perché in questo caso gli elettroni interagiscono con le vibrazioni reticolari che fanno diffondere gli elettroni di una stessa banda di valenza variandone la quantità di moto p. L'eccitazione di vibrazioni più ampie viene descritta come un processo di *generazione* di fononi, mentre se l'elettrone riceve energia dalle vibrazioni degli ioni reticolari si ha un *assorbimento* di fononi.

La ***figura 4.1*** mostra la struttura a bande di un semiconduttore diretto (arseniuro di gallio) e quella di un semiconduttore indiretto (silicio). Le lacune hanno sempre un massimo di energia in corrispondenza di $k = 0$, mentre per gli elettroni si hanno massimi e minimi differenti.

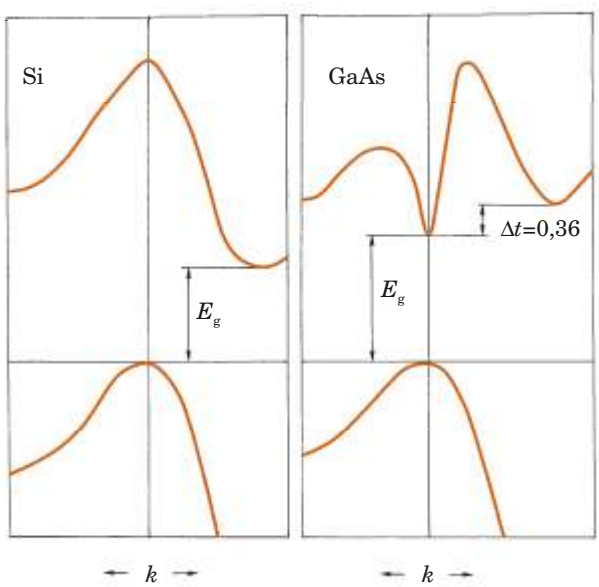


Fig. 4.1
Struttura a bande di un semiconduttore indiretto (silicio) e diretto (arseniuro di gallio).

Un semiconduttore è detto **diretto** quando il massimo di energia della banda di valenza e il minimo della banda di conduzione si trovano nella posizione per cui il vettore d'onda è nullo; in questa posizione la ricombinazione elettrone-lacuna avviene senza variazione della quantità di moto e, per il principio di conservazione dell'energia, si libera un'energia pari a

quella di interbanda sottoforma di un fotone ($h \cdot \nu = E_c - E_v$). Quando il massimo della banda di valenza e il minimo della banda di conduzione hanno un differente valore del vettore d'onda, il semiconduttore è detto **indiretto**.

Il processo di ricombinazione elettrone-lacuna deve avvenire nel rispetto del principio di conservazione dell'energia e della quantità di moto.

Nei **semiconduttori diretti**, la conservazione della quantità di moto è garantita dalla costanza del vettore di propagazione ($k = 0$), quella dell'energia dall'emissione del fotone.

Nei **semiconduttori indiretti**, lo spostamento dell'elettrone dalla banda di conduzione alla banda di valenza può avvenire, per il principio di conservazione dell'energia e della quantità di moto, solamente attraverso centri di ricombinazione intermedi o con l'emissione di fononi (oscillazioni locali del reticolo cristallino).

È evidente che nei materiali diretti la probabilità di un'emissione fotonica è maggiore di quella offerta dagli indiretti, che emettono fotoni e fononi. L'**efficienza**, cioè la percentuale di ricombinazioni che danno luogo all'emissione di fotoni, nella maggior parte dei materiali semiconduttori indiretti è così bassa che non è possibile rilevare le radiazioni emesse nel processo di ricombinazione.

Sono semiconduttori indiretti: il silicio, il germanio, il carburo di silicio. Alla categoria dei semiconduttori diretti appartengono alcuni composti binari e ternari degli elementi appartenenti al III-V gruppo della tavola periodica degli elementi, quali l'arseniuro di gallio (GaAs), il fosfuro arseniuro di gallio (GaAsP), l'arseniuro di indio (InAs), il fosfuro di indio (InP); tutti questi composti presentano elevate efficienze e permettono di realizzare dispositivi che emettono una radiazione di intensità rilevante e utilizzabile.

La **lunghezza d'onda** λ della radiazione emessa dipende dal salto di energia necessario per il passaggio degli elettroni dalla banda di conduzione a quella di valenza (*band-gap*, *energy-gap*) e dai livelli di drogaggio dei materiali semiconduttori utilizzati (▸ ***Fig. 4.2***).

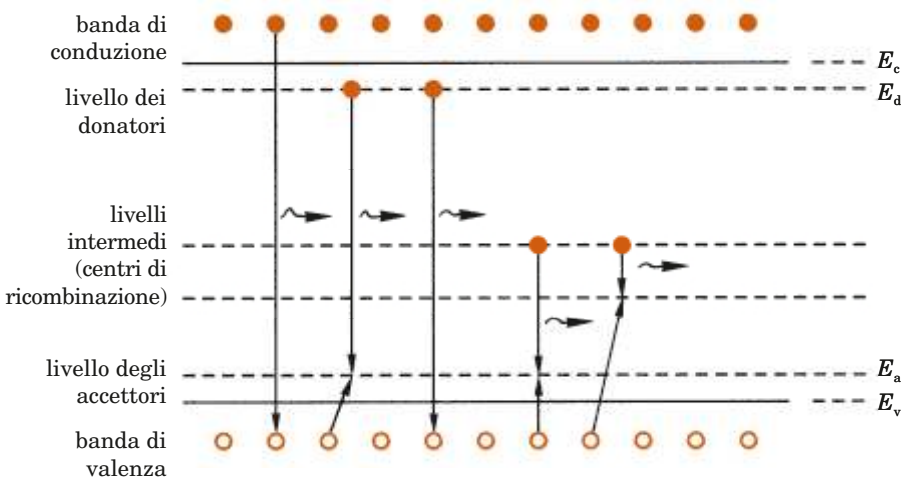


Fig. 4.2
Rappresentazione sul diagramma a bande delle transizioni e dell'emissione fotonica di una giunzione PN.

Nel caso dell'**arseniuro di gallio**, la transizione diretta fra banda di conduzione e banda di valenza genera una radiazione di lunghezza d'onda:

$$\lambda = \frac{h\,c}{\Delta W} = 900$$

dove:

h è la costante di Planck $h = 4{,}135 \cdot 10^{-15}$ eV · s oppure $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J · s
c è la velocità della luce $c = 2{,}998 \cdot 10^{8}$ m/s
ΔW è la differenza di energia fra le bande; per l'arseniuro di gallio ΔW = 1,38 eV

Caratteristiche elettriche

I principali parametri sono:
— I_F, corrente di polarizzazione diretta massima (continua), circa 60 ÷ 80 mA;
— I_F, corrente di polarizzazione diretta di picco, circa 1 A;
— V_R, tensione inversa massima, presenta valori molto bassi di 3 ÷ 5 V;
— V_F, tensione diretta, presenta valori tipici di 1,6 ÷ 3 V (misurati con correnti di 10 mA);
— P_D, potenza dissipata massima.

Il **rendimento di conversione** è dato dal rapporto tra la potenza della radiazione emessa e la potenza applicata, e di norma è pari a circa il 50%. L'intensità luminosa della radiazione emessa è direttamente proporzionale alla corrente continua; tale relazione è di tipo non lineare e viene definita tramite una specifica curva caratteristica.

La **curva caratteristica tensione-corrente** è analoga a quella dei normali diodi a giunzione (▸ ***Fig. 4.3***). La tensione di soglia, più elevata di quella di un normale diodo, varia da 1,8 a 4 V e dipende dal colore della luce emessa.

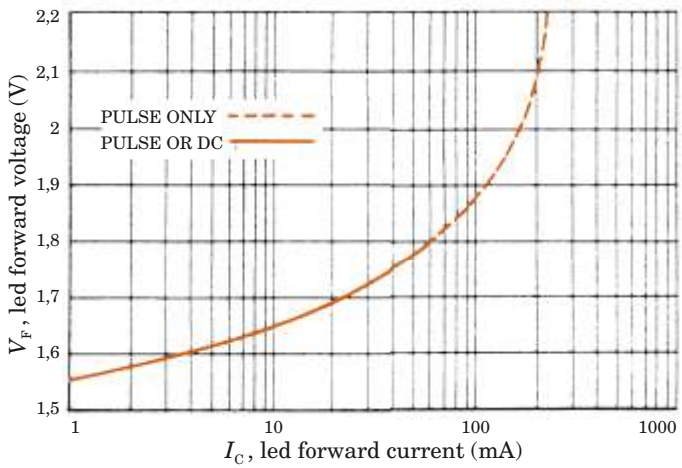


Fig. 4.3
Curva caratteristica corrente-tensione di un diodo led (*fonte*: Motorola).

La **tensione inversa massima** per questi diodi è relativamente bassa (tipicamente circa 5 V_{dc}), per cui non li si può utilizzare come rettificatori, anzi, in alcune applicazioni occorre proteggerli da eventuali sovratensio-

ni negative. Anche la **potenza dissipabile** è bassa, tipicamente circa 200 mW.

L'intervallo delle **temperature di funzionamento** è compreso fra –55 e 100 °C.

La **radiazione emessa** può essere valutata tramite:

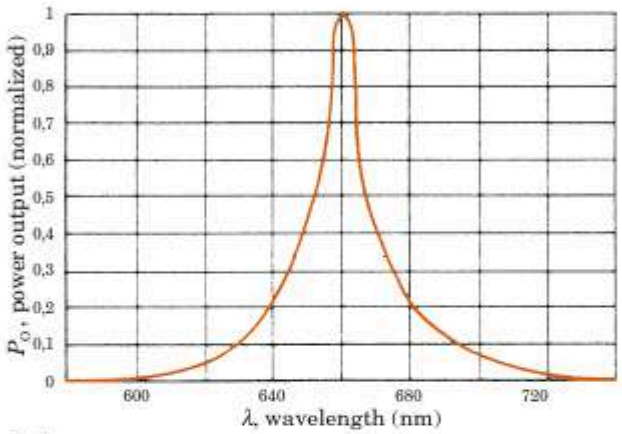
— il diagramma spettrale di emissione (▸ ***Fig. 4.4***);

— il diagramma polare angolare di emissione (▸ ***Fig. 4.5***);

oppure attraverso alcuni parametri caratteristici quali:

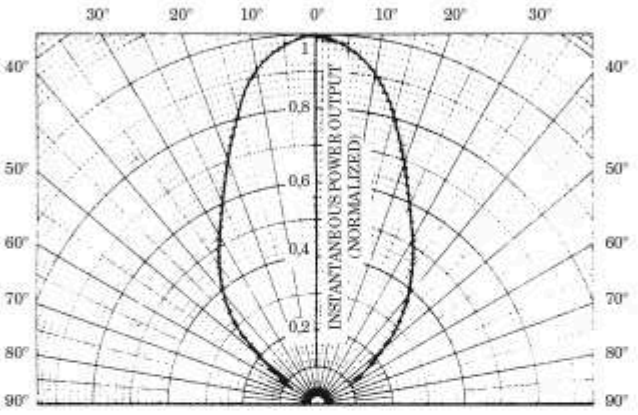
— λ_p, che è la lunghezza d'onda di picco espressa in Å (ångström), μm o in nm, e misurata con una corrente continua pari a I_F = 60 mA;

Fig. 4.4
Riga spettrale che evidenzia la lunghezza d'onda di emissione dei vari materiali elettroluminescenti (*fonte*: Motorola).



4.4

Fig. 4.5
Diagramma polare angolare della distribuzione angolare della luce emessa da un led (*fonte*: Motorola).



4.5

— $\Delta\lambda_p$, che è la larghezza di banda dello spettro in cui la potenza emessa è superiore alla metà della potenza di picco;

— P_o, che è la potenza luminosa emessa in direzione assiale;

— t_{ON}, che è il tempo di accensione, ossia l'intervallo di tempo che intercorre fra l'applicazione della tensione e l'accensione del led;

— t_{OFF}, che è il tempo di spegnimento, ossia l'intervallo di tempo che intercorre fra l'annullamento della tensione applicata e lo spegnimento del led;

— θ, che è l'angolo di osservazione.

La massima **luminosità** di un led si ottiene con un'alimentazione in corrente continua; la tensione diretta necessaria dipende dal colore e varia da 2 a 4 V. L'emissione luminosa si riduce con l'aumentare della temperatura, ma è un effetto reversibile e non ha influenza sulla vita media del dispositivo. La massima **temperatura di funzionamento** di un diodo led è di norma di 100 °C e non dev'essere superata. Il flusso luminoso del led è destinato, per fenomeni fisici e chimici di invecchiamento, a decadere nel tempo; quando decade del 50% rispetto al valore iniziale, il led, per definizione, ha esaurito la sua vita utile e dev'essere sostituito. Il valore tipico di vita utile di un diodo led è di 100 000 ore di attività.

Nella ***tabella 4.1*** sono elencati i valori assunti dai parametri caratteristici dei diodi led a infrarossi (IRED).

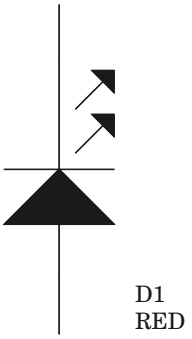


Fig. 4.6
Simbolo grafico di un diodo led.

Tabella 4.1 Parametri dei diodi IRED (*fonte*: Motorola)

INFRARED EMITTING DIODE

Device	Power output @ I_F		Emission angle	Peak emission wavelength	Forward voltage	
	µW (Typ)	(mA)	(Typ)	mm (Typ)	V (max)	@ I_F (mA)
MLED71	2500	50	60°	940	1,8	50
MLED76	4000	100	60°	660	2,2	60
MLED77	2500	100	60°	850	2	100
MLED81	16000	100	60°	940	1,7	100
MLED930	650	100	60°	940	1,5	50

Rappresentazione grafica

Simbolo grafico e lettera di identificazione

Il simbolo grafico è identico a quello del diodo a giunzione con l'aggiunta di una o due frecce (▸ ***Fig. 4.6***).

Per l'identificazione si utilizza la stessa sigla dei diodi (CR o D). Talvolta, se il led è usato come indicatore o strumento di segnalazione, si utilizza la sigla DS.

Sigla commerciale e tipo di contenitore

Poiché non esiste una norma che permetta una decodifica univoca delle sigle commerciali, è necessario consultare di volta in volta i fogli tecnici delle case costruttrici.

La forma dei led è molto varia: ne esistono di sferici, cilindrici, piatti, rettangolari, quadrati, triangolari, a forma di freccia (▸ ***Fig. 4.7***).

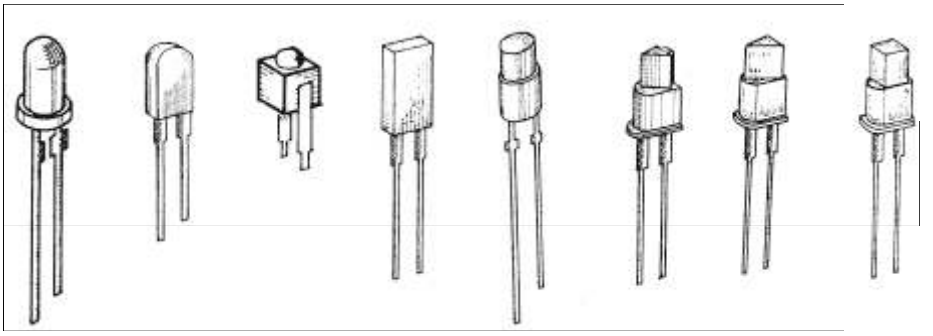


Fig. 4.7
Forme del contenitore del diodo led.

Il tipo più utilizzato è quello sferico di colore rosso nei diametri di 3 ÷ 5 mm (▸ ***Fig. 4.8***), e sfrutta la tecnologia **THT**. Sul mercato sono disponibili anche led che utilizzano la tecnologia a montaggio superficiale (**SMT**); questi ultimi offrono il vantaggio di poter essere assemblati più rapidamente e sono di qualità superiore.

THT
– Through-hole technology
SMT
– Surface mounting technology

Applicazioni

Il diodo led viene usato nelle apparecchiature elettroniche principalmente come segnalatore di stato. Nella maggior parte delle applicazioni è possibile ottenere la giusta emissione di luce con correnti dirette di 5 ÷ 25 mA per il led rosso, e di 10 ÷ 40 mA per il led giallo o verde. Se il diodo led è alimentato in corrente alternata occorre collegare, in modo antiparallelo

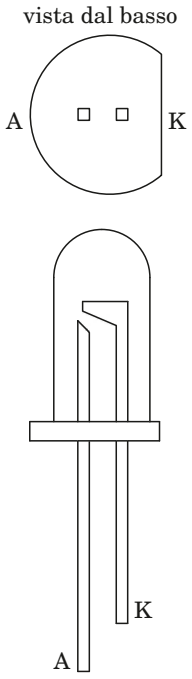


Fig. 4.8
Diodo led sferico.

a esso, un diodo a giunzione, e nel dimensionamento il valore della corrente diretta circolante dev'essere raddoppiato.

I diodi led sono largamente impiegati nel settore dei trasporti, nelle luci di regolazione del traffico (nei semafori), nei fanali degli autoveicoli, come retroilluminazione dei cruscotti, nelle piste degli aeroporti e nei pannelli pubblicitari.

Sono anche utilizzati come luci di segnalazione negli ambienti interni (nei cinema e nei teatri), e si stanno diffondendo negli impianti domestici al posto delle lampade a incandescenza perché presentano, rispetto alle lampade, i seguenti vantaggi:

— consumi bassi;
— mortalità iniziale trascurabile;
— vita media superiore di almeno 10 volte;
— ingombro ridotto;
— migliore qualità di emissione (più vicina a quella solare).

Hanno peraltro lo svantaggio di un costo iniziale più elevato.

La circostanza che ha permesso l'affermazione nelle applicazioni dei diodi led è stata la comparsa sul mercato di dispositivi elettronici in grado di erogare le forti correnti necessarie per ottenere una buona visibilità dei led anche in presenza della luce solare. Il salto qualitativo è stato reso possibile anche dai nuovi led blu e bianchi a elevata intensità luminosa. I led bianchi sono utilizzati nell'illuminotecnica e nell'illuminazione in retroilluminazione dei display, mentre quelli blu consentono di creare il sistema rosso-verde-blu e di ottenere la luce multicolore.

Illuminazione a led

La nuova tecnologia dei led ad alta luminosità si sta affermando nel campo dell'illuminotecnica, in quanto rende possibile nuove soluzioni rispetto a quelle tradizionali basate su lampade a incandescenza e a gas sia nel campo civile pubblico e privato sia nell'illuminazione pubblica.

L'illuminazione a led utilizza ora i nuovi led RGB (Rosso,Verde e Blu) che, guidati da appositi circuiti, permettono di ottenere, mescolando opportunamente i tre colori, una vasta gamma di colorazioni molto utili in varie applicazioni civili e industriali.

I circuiti elettronici che controllano l'emissione dei led utilizzano microcalcolatori che, grazie a un'opportuna programmazione, rendono possibile lo scorrimento (scrolling) dei colori e quindi di "agganciare" un particolare colore al variare delle condizioni operative.

Esistono, però, due grossi ostacoli a un largo impiego dei diodi led ad alta luminosità:

1. la temperatura che, influenzando il funzionamento del led, deteriora il flusso luminoso e modifica la lunghezza d'onda dominante, e quindi il colore emesso;
2. la differenza fra i led prodotti in lotti differenti e/o da diversi produttori.

Il circuito di controllo misura la temperatura tramite un termistore, o un sensore di temperatura, collocato vicino al led e il microcalcolatore, dopo aver acquisito in forma digitale la misura, utilizza un'equazione approssimata per determinare la temperatura sulla giunzione, poi, mediante

una tabella di ricerca (*look-up table*) bi-tridimensionale, regola con precisione la forma d'onda della variazione di luminosità fino a compensare la riduzione dell'intensità luminosa.

Anche il problema delle differenti caratteristiche dei led provenienti da produttori diversi o da lotti diversi viene compensato utilizzando delle tabelle di ricerca memorizzate nel microchip, che utilizzano le informazioni, associate a ogni lotto, fornite dal costruttore. Queste tabelle, denominate *bin-code* (codice dei blocchi), contengono informazioni sul lotto di led relative all'intensità del flusso luminoso, alla lunghezza d'onda dominante e alla tensione diretta.

Le compensazioni descritte sono, quindi, controllate da microcalcolatori che utilizzano algoritmi o che, operando sulle informazioni provenienti dai sensori di temperatura e dai bin-code, prelevano dalle tabelle di ricerca le informazioni per ottenere i comandi da inviare al driver che pilota i led. Si consegue così la possibilità di compensare le derive termiche e di ottenere, in modo accurato, la mescolanza di colori (*color mixing*) desiderata.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Qual è il principio di funzionamento di un diodo led?
2. Da che cosa dipende la lunghezza d'onda della radiazione emessa da un diodo led?
3. Quali sono i parametri principali che caratterizzano il comportamento di un diodo led?
4. Da che cosa dipende il colore emesso da un led?
5. Come si ottiene la massima luminosità di un led?
6. Quali sono i settori in cui vengono impiegati i diodi led?
7. Rispetto alle lampade a incandescenza, quali vantaggi offrono i diodi negli impianti domestici?

2 DISPLAY

Display a led

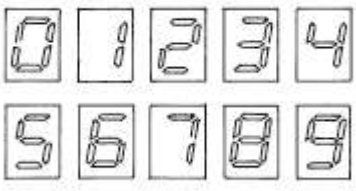
Il display è un particolare assemblaggio di diodi led che riproduce, in forma stilizzata, le dieci cifre del sistema numerico decimale (▸ ***Fig. 4.9***). Ogni cifra viene composta mettendo in conduzione le coppie di diodi contenute in ciascuno dei sette segmenti.

In funzione dello schema di connessione si distinguono due tipi di display (▸ ***Figg. 4.10a, b***):

— nella **configurazione a catodo comune** i catodi di tutti i diodi dei vari segmenti sono connessi fra loro;

— nella **configurazione ad anodo comune** sono gli anodi a essere connessi fra loro.

Fig. 4.9
Visualizzazione delle cifre decimali su un display a 7-segmenti.



Oltre ai sette segmenti utilizzati per rappresentare le cifre decimali, il display contiene un ottavo led che viene usato come punto decimale.

Con il display a sette segmenti è possibile visualizzare anche alcune lettere dell'alfabeto, una possibilità utilizzata per decodificare alcuni codici particolari come l'esadecimale. I caratteri ottenibili sono però di bassa qua-

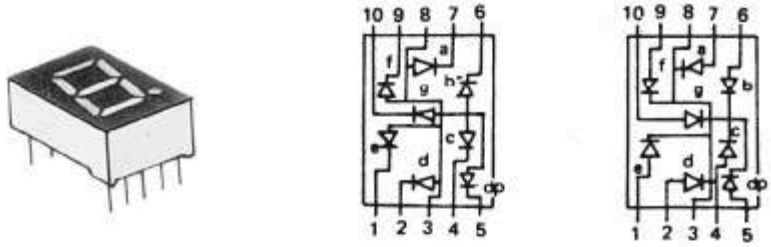
Figg. 4.10a, b
Connessione ad anodo e catodo comune:

a. contenitore a schema di attribuzione dei segnali ai terminali;

b. tabella di comparazione.

224400 LTS 546 AR red AC
224410 LTS 547 AR red CC
224404 LTS 546 AG green AC
224414 LTS 547 AG green CC

digit height: 12,7 mm
AC common anode
CC common cathode



4.10a

CROSS LIST

224400	224410	224404	224414
HDSP 5301	HDSP 5303	HDSP 5801	HDSP 5803
DL 507	DL 500	TIL 717	TIL 718
TIL 701	TIL 702	D 302 PA	D 302 PK
D 350 PA			

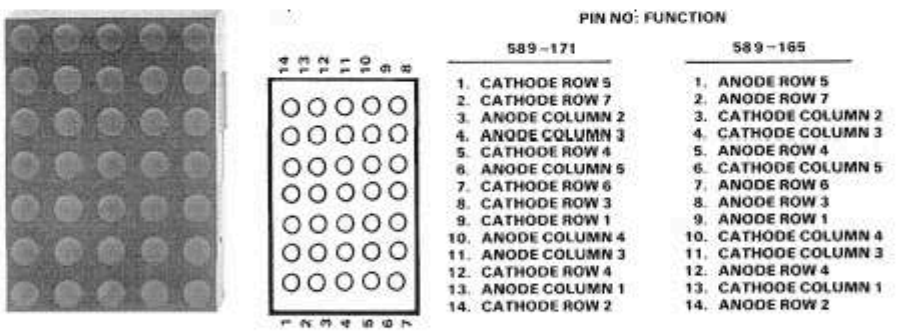
4.10b

lità; per rappresentare in forma accettabile caratteri alfanumerici, cioè lettere e numeri, sono necessari display realizzati con più di sette segmenti. Un assemblaggio interessante è quello detto **a matrice di diodi**, che permette rappresentazioni alfanumeriche di migliore qualità (▸ ***Fig. 4.11***).

Il metodo più semplice per pilotare un display consiste nell'utilizzare un decodificatore-amplificatore di corrente (*decoder-driver*) per ogni cifra e utilizzare display e decodificatore uno indipendentemente dall'altro (▸ ***Fig. 4.12***).

Fig. 4.11
Display a matrice led (*fonte*: Hewlett-Packard).

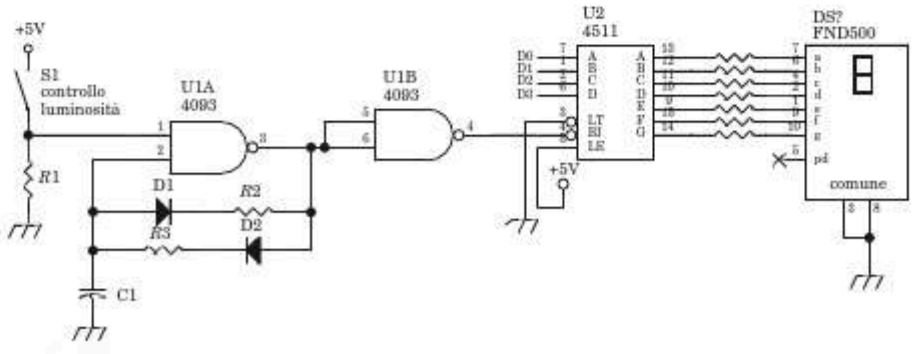
Alt. 53 mm
Largh. 37,5 mm
Prof. 9 mm
Distanza piedini 2,54 mm
Distanza file 38,1 mm



4.11

Fig. 4.12
Decodificatore-driver BCD-7 segmenti per un display a sette segmenti a catodo comune.

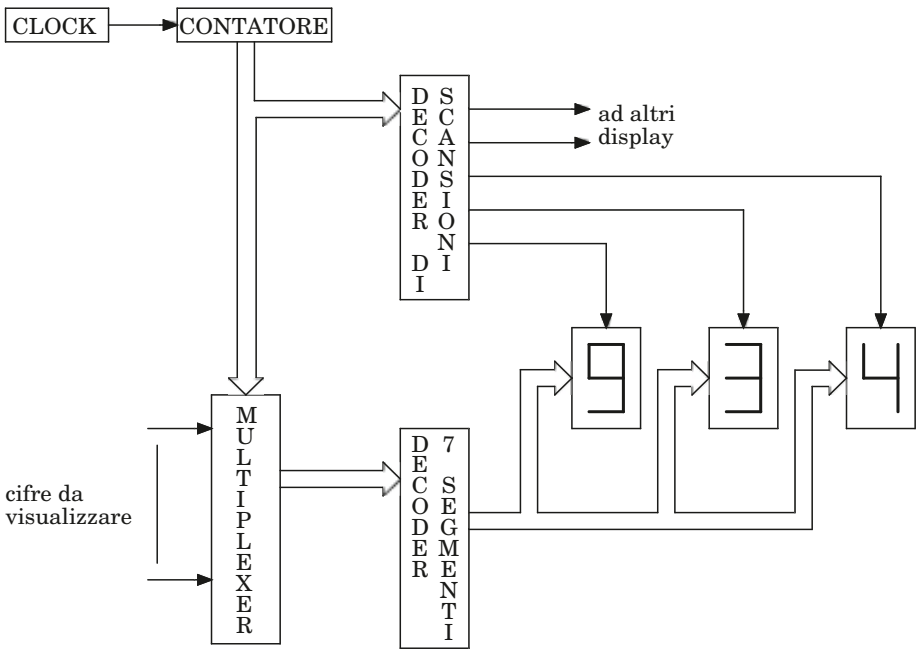
alta luminosità
bassa luminosità



4.12

Una tecnica che riduce il numero di decodificatori, e quindi il numero di interconnessioni fra decodificatori e display, è la **connessione a divisione di tempo multiplata** (▸ ***Fig. 4.13***). La cifra da visualizzare viene selezionata dal contatore tramite il multiplexer, contemporaneamente viene attivata la connessione comune del display che deve visualizzare il dato. Solo questo display visualizza la cifra; a questo punto il contatore incrementa e seleziona la cifra successiva, la visualizza sul display successivo e così via per tutte le cifre del visualizzatore. Il modulo del contatore determina quante cifre si possono visualizzare, la frequenza del segnale di clock, la frequenza di aggiornamento delle cifre e quindi la loro luminosità. Il circuito di comando che permette di ottenere queste prestazioni è abbastanza complesso per cui in genere, per ottenere questa funzionalità, si adoperano circuiti LSI che lo contengono già integrato, come per esempio lo ZN1040E o l'ICL7217.

Fig. 4.13
Schema a blocchi di un circuito di comando di tre o più display multiplato.



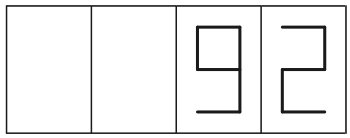
Se si desidera controllare l'emissione luminosa di un display, un modo semplice è quello di pilotare l'ingresso di oscuramento (*blanking*) del decoder con un'onda quadra, come mostra la figura 4.14: il duty-cycle dell'onda quadra determina il livello di luminosità del display. Inserendo in serie un potenziometro nel ramo che controlla la carica del condensatore si può regolare il tempo t_{on} del ciclo, e quindi la luminosità del display.

RBI
– Ripple blanking input
RBO
– Ripple blanking output

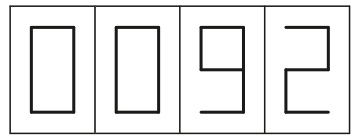
Se si utilizza un decoder che possiede gli ingressi di **RBI** e **RBO**, come i decoder TTL 7447 e 7448, si può controllare anche la visualizzazione degli zero non significativi (▸ ***Figg. 4.14a, b, c***); ne abbiamo proposto un esempio applicativo nel ***Volume 1, Mod. F, Cap. 20***.

Simbolo grafico e lettera di identificazione

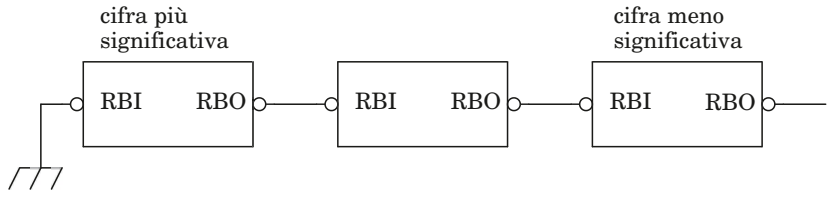
Non esiste un vero e proprio simbolo grafico per il disegno di un display; di solito si utilizza un rettangolo rappresentando i vari segmenti nella stessa



4.14a



4.14b



4.14c

Figg. 4.14a, b, c
Schema a blocchi di connessione di tre decodificatori BCD-7 segmenti per ottenere la soppressione dello zero non significativo:
a. display con soppressione dello zero non significativo;
b. display senza soppressione dello zero non significativo;
c. schema a blocchi.

posizione in cui si trovano sul dispositivo fisico reale (▸ ***Fig. 4.15***). È buona norma, quando lo schema elettrico dev'essere usato per la realizzazione del prototipo o dei master per il circuito stampato, identificare tutti i morsetti, anche quelli non utilizzati. Il numero di identificazione di ciascun morsetto viene indicato al di sopra della linea di collegamento, e comunque sempre al di fuori del simbolo. Non esiste una lettera normalizzata per l'identificazione del display; si può tuttavia ricorrere alle lettere DS, utilizzate dalle norme per i dispositivi di segnalazione generici.

Sigla commerciale e tipo di contenitore

Non esiste una regola per l'identificazione univoca della sigla. La forma del contenitore tipico è quella di un parallelepipedo a base rettangolare con 10 terminali: cinque per lato (▸ ***Fig. 4.16***).

Le dimensioni sono molto variabili e in genere non normalizzate; molto utilizzata è la serie DIL, nella quale la distanza fra le file di reofori è pari a 5,08 mm (200 in).

Il display è impiegato in tutti quei casi in cui l'apparecchiatura dev'essere interfacciata con l'utente in modo tale che quest'ultimo possa facilmente interpretare i risultati delle elaborazioni (conteggi, confronti, calcoli).

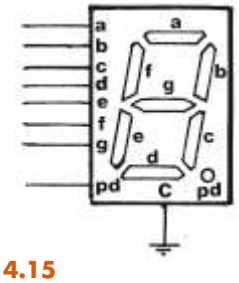


Fig. 4.15
Simbolo grafico e identificazione di un display a 7-segmenti.

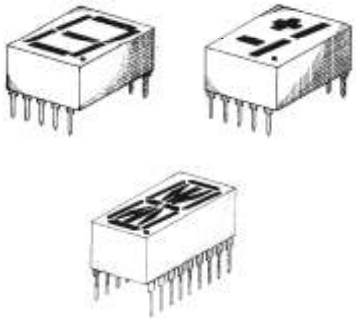


Fig. 4.16
Forma del contenitore di un display a 7-segmenti.

Display a cristalli liquidi (LCD - Liquid crystal display)

Per generare i caratteri, il display a cristalli liquidi non emette luce propria, ma sfrutta quella dell'ambiente modificandola.

I cristalli liquidi sono materiali che in certe condizioni di temperatura possono presentare proprietà caratteristiche dei liquidi, e in altre condizioni proprietà caratteristiche dei solidi: sono, cioè, materiali che si trovano nella cosiddetta **fase mesomorfa** o **mesofase**. In questa fase le loro molecole possiedono una grande libertà di movimento, come avviene nei liquidi, mentre in altre circostanze possono disporsi con un certo ordine, come avviene nei materiali solidi cristallini. La condizione di mesofase di questi materiali può però aver luogo solo entro un determinato campo di temperature: a un estremo abbiamo infatti la temperatura di transizione solido-liquido (punto di fusione), all'altro estremo una temperatura di transizione più elevata oltre la quale le molecole si trovano in una condizione di completo disordine, per cui il materiale si comporta come un liquido. Alle temperature comprese fra questi limiti, gli assi delle molecole presentano un andamento preferenziale detto **direttore del cristallo liquido**.

Per utilizzare un LCD è necessario che la temperatura limite della condizione di mesofase sia la più bassa possibile, e comunque inferiore

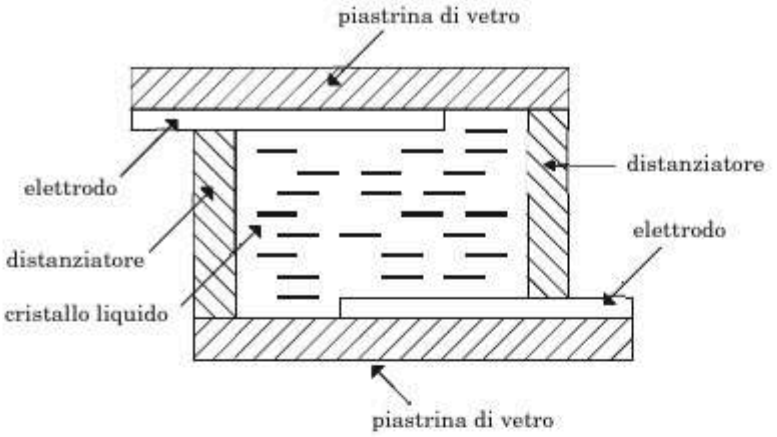


Fig. 4.17
Struttura di un display LCD.

alla temperatura ambiente; il campo ottimale di temperatura è in genere di $-10 \div +80$ °C. Due tipici materiali che manifestano le proprietà descritte sono il para-azossianisolo (PAA) e il meta-butilbenzolo (MBBA).

La ***figura 4.17*** mostra la struttura tipica di questo dispositivo. Il cristallo liquido è posto fra due sottili piastrine di vetro sulla cui superficie interna vengono depositati per evaporazione due strati di zinco e di indio, che formano gli elettrodi del dispositivo; gli strati sono così sottili da essere trasparenti. La faccia interna delle piastrine è inoltre trattata per far variare l'orientamento delle molecole che si trovano nelle immediate vicinanze degli elettrodi. A causa delle forze che di norma interagiscono tra le particelle, le molecole vicine alla superficie degli elettrodi producono un cambiamento di orientamento anche nelle molecole che formano il sottile strato (circa 10 μm) di cristallo liquido, determinando una notevole trasparenza. La luce che attraversa la cella ha la stessa direzione del campo elettrico che si può applicare tra i due elettrodi, per cui la direzione risulta perpendicolare alla direzione di polarizzazione del cristallo liquido.

L'applicazione ai due elettrodi di una tensione continua, e quindi di un campo elettrico esterno, produce una modificazione dell'orientamento delle molecole del cristallo liquido (▸ ***Fig. 4.18***). L'applicazione di una tensione continua superiore a un valore di soglia produce nel cristallo una turbolenza (*scattering* dinamico) tale da rendere lo strato, da trasparente, opaco.

L'impiego di una tensione continua può però provocare fenomeni di elettrolisi (reazioni galvaniche) che possono distruggere uno degli elettro-

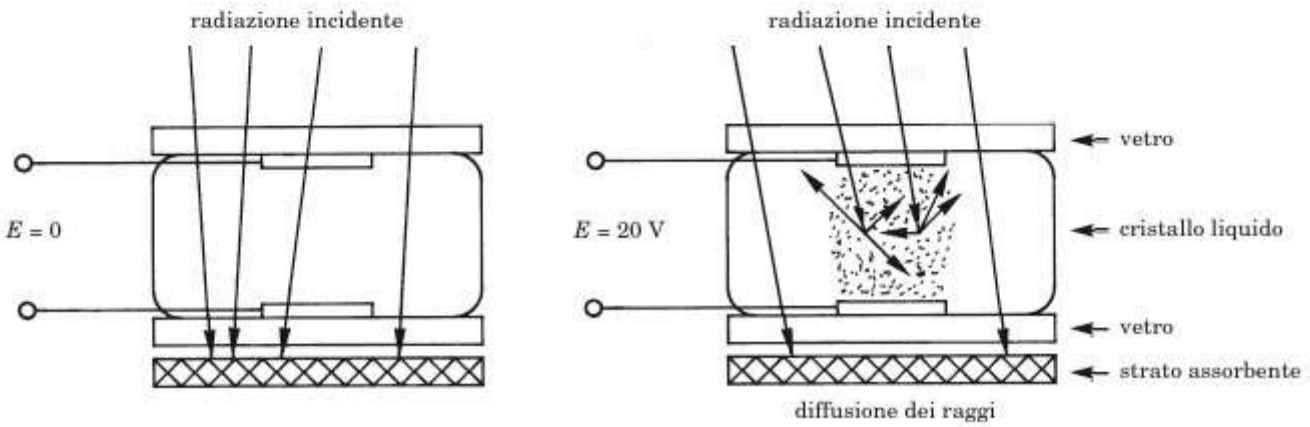


Fig. 4.18
Effetto del campo elettrico sull'orientamento delle molecole del cristallo liquido.

di o degradare i cristalli liquidi, per cui si preferisce utilizzare una tensione di pilotaggio degli elettrodi alternata (onda quadra) a bassa frequenza.

Visualizzatori LCD

Visualizzatori a scattering dinamico

DSM
– Dynamic scattering mode

Un visualizzatore LCD che sfrutta il fenomeno descritto, lo scattering dinamico (**DSM**), è costituito da più parti (▸ ***Fig. 4.19***):

— una lastra di vetro sulla cui superficie interna, mediante evaporazione, è stato deposto uno strato di ossido di stagno che riproduce la sagoma del disegno (segmento, pittogramma o altro) da visualizzare; il materiale utilizzato dev'essere otticamente trasparente ed elettricamente conduttore;
— uno sottile strato di ossido depositato sugli elettrodi che provvede a isolarli dal cristallo liquido per prevenire fenomeni di elettrolisi;
— un distanziatore che separa il vetro anteriore da quello posteriore e crea la camera in cui verrà inserito il cristallo liquido;
— un vetro posteriore sul quale sono applicati gli elettrodi trasparenti che riproducono la stessa sagoma del disegno depositato sul vetro anteriore, con l'aggiunta delle connessioni per accedere alle varie parti che compongono la cifra o il numero da visualizzare;
— uno schermo nero sul fondo che assorbe la luce incidente.

Se non viene applicata alcuna tensione agli elettrodi, la luce incidente attraversa i vari strati che compongono il display, che sono trasparenti e vengono assorbiti dallo schermo scuro; se a un elettrodo si applica una tensione, la zona di cristallo liquida sottostante la sagoma dell'elettrodo risulta soggetta a un campo elettrico che la rende turbolenta e opaca: la luce incidente sul quell'area viene diffusa (*scattering*) producendo un'immagine bianca su sfondo nero. Il tempo di risposta di questo tipo di LCD è dell'ordine delle decine di millisecondi.

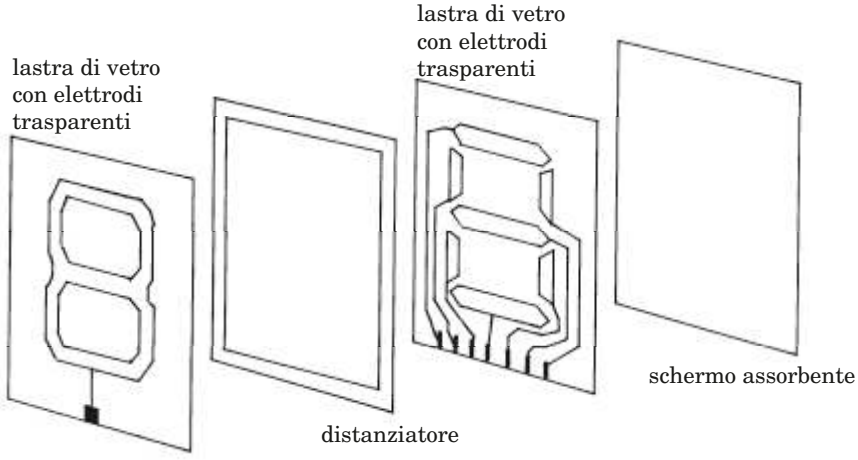


Fig. 4.19
Struttura di un display LCD a scattering dinamico.

Visualizzatori a effetto di campo

TNFE
– Twisted nematic field effect
TN
– Twisted nematic

I display a scattering dinamico sono stati attualmente in larga parte sostituiti da quelli a effetto di campo, detti **TNFE**.

La ***figura 4.20*** mostra un tipico display LCD a effetto di campo del tipo **TN**. Oltre agli elementi costitutivi del modello a scattering dinamico, il visualizzatore utilizza due schermi di polarizzazione della luce, uno anteriore e uno posteriore, ortogonali fra loro.

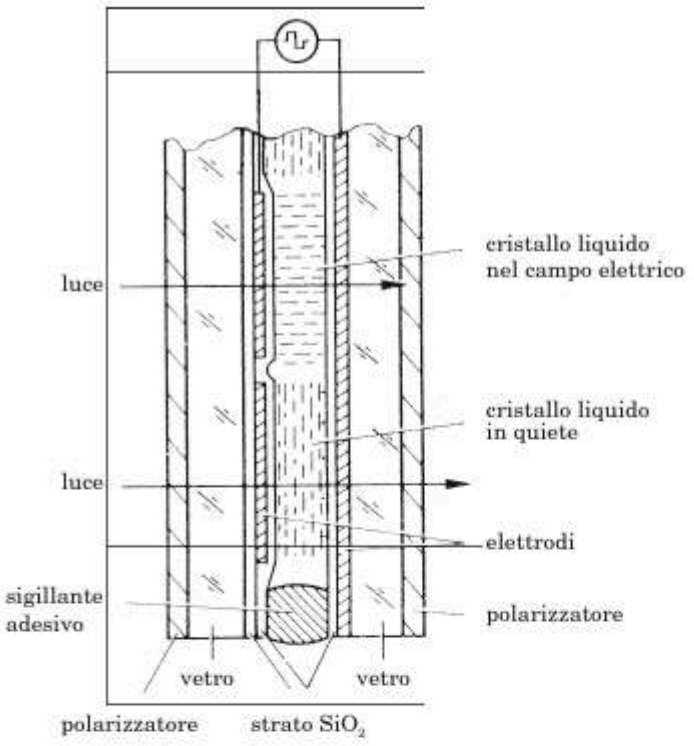


Fig. 4.20
Configurazione di base di un display LCD di tipo TN.

Lo schermo assorbente del modello precedente è stato sostituito da uno schermo riflettente, costituito da un film di allumino depositato su un substrato di vetro. Il liquido interposto fra le superfici di vetro è costituito da molecole nematiche composte da lunghe catene polimeriche orientabili elettricamente. Le molecole di liquido nematico sono allineate parallelamente alla superficie del vetro ma descrivono una spirale, cosicché la catena molecolare su una delle superfici è ortogonale a quella opposta (▸ ***Fig. 4.21***).

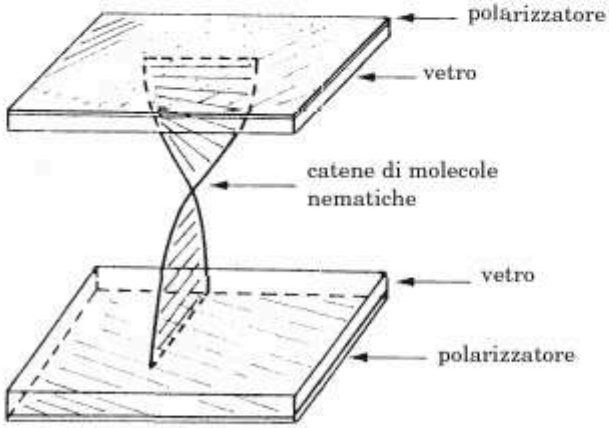
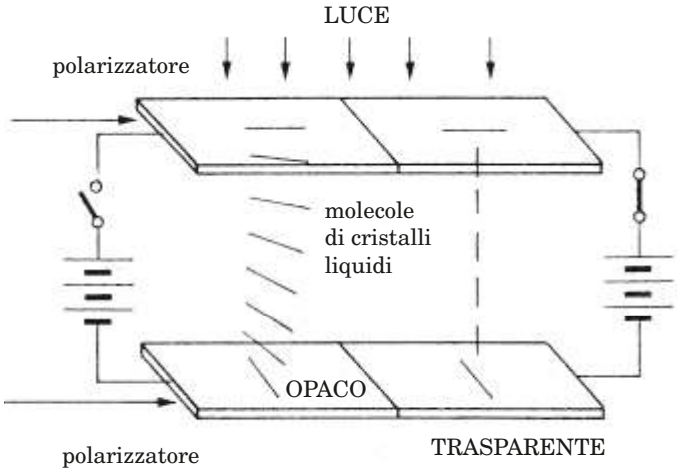


Fig. 4.21
Disposizione delle molecole neomatiche del cristallo liquido fra le lastre di vetro.

Se gli elettrodi non sono sotto tensione e si invia un fascio di luce, quest'ultimo attraversa lo schermo di polarizzazione anteriore, si polarizza, attraversa il liquido, compie una rotazione di 90° (polarizzandosi in modo ortogonale a quello di ingresso), attraversa gli elettrodi che sono trasparenti e, poiché è correttamente polarizzato, supera il polarizzatore posteriore e la luce viene riflessa dallo schermo riflettente posteriore. Lo sfon-

do appare quindi chiaro (▸ ***Fig. 4.22***). Se il polarizzatore posteriore è parallelo a quello anteriore, la radiazione, dopo la rotazione subita nel liquido nematico, non può oltrepassare il polarizzatore, per cui viene assorbita e lo sfondo appare opaco.

Fig. 4.22
L'applicazione di un campo elettrico in un display LCD di tipo TN consente di modificare l'orientamento delle molecole e di conseguenza la trasmissibilità della cella.

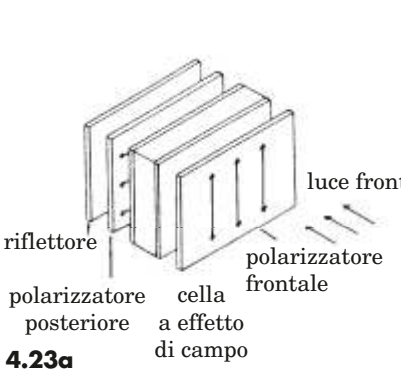


Il liquido nematico utilizzato è dotato di una spiccata anisotropia dielettrica: è quindi possibile modificare l'orientamento delle molecole tramite l'applicazione di un campo elettrico.

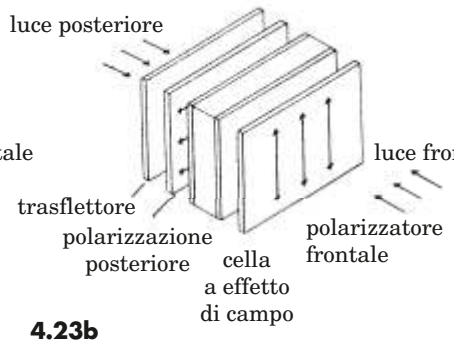
Se agli elettrodi si applica la tensione, superato un valore di soglia che dipende dalle caratteristiche del liquido, le molecole del cristallo poste fra di essi ruotano e il loro asse si allinea nella direzione del campo elettrico; ciò consente di rendere massima la trasmissività della luce, non si ha più la rotazione di 90° del piano di polarizzazione e pertanto la luce è assorbita dal polarizzatore posteriore. Si crea così un effetto di contrasto fra le zone soggette all'azione del campo elettrico (**zone scure**) e quelle che lasciano passare la luce sia trasmessa sia riflessa (**zone chiare**). Al cessare del campo elettrico, le molecole si depolarizzano e si ridispongono nella posizione originaria, impedendo il passaggio della luce: l'immagine della sagoma dell'elettrodo appare nera su sfondo bianco. Se invece il polarizzatore posteriore è parallelo a quello anteriore, la luce lo attraversa e viene riflessa dallo specchio, generando caratteri chiari su sfondo scuro.

Questo tipo di LCD, caratterizzato da valori di soglia molto bassi (2 V), tempi di risposta che variano fra 50 e 200 ms e consumi estremamente ridotti, funziona nei seguenti modi (▸ ***Figg. 4.23a, b, c***):

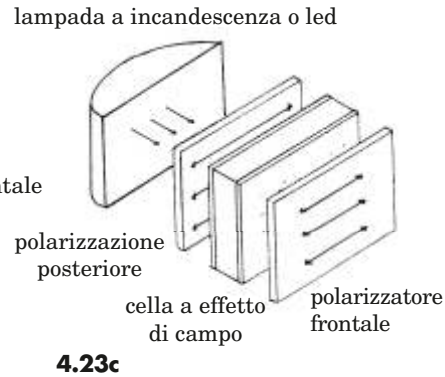
Figg. 4.23a, b, c
Modi di funzionamento dei display LCD:
a. per riflessione;
b. per trasmissione;
c. per riflessione e trasmissione.



4.23a



4.23b



4.23c

— **modo a riflessione** (*reflective display*), è il modo che è stato descritto; si avvale di uno specchio riflettente e ricava l'illuminazione dall'ambiente in cui opera; presenta buona luminosità e ottimo contrasto;
— **modo a trasmissione** (*trasmissive display*), ricava l'illuminazione da una sorgente luminosa posta sul lato posteriore del dispositivo; offre il vantaggio di funzionare anche in presenza di un'intensità luminosa ambientale insufficiente;
— **modo a riflessione e trasmissione**, sul pannello posteriore del display è depositato uno strato di materiale semiriflettente capace di riflettere in modo parziale la luce ambientale incidente e di sfruttare una retroilluminazione; questa caratteristica lo rende adatto a tutte le condizioni di illuminazione (luce ambientale e buio).

I visualizzatori di questo tipo, che hanno un'alta densità (fino a 128 000 punti o pixel) e un effetto di contrasto molto elevato, sono molto adatti all'impiego nei personal computer di tipo portatile, dotati di grafica ad alta risoluzione.

Conclusioni

Il contrasto osservato in un LCD dipende dalla tensione applicata e dall'angolo di osservazione. I display LCD si devono alimentare in alternata mediante un'onda quadra che contenga una componente continua non superiore a 100 mV al fine di impedire il deterioramento del dispositivo. La frequenza del segnale di pilotaggio è limitata inferiormente dall'insorgere di uno sfarfallio (*flicker*) delle cifre visualizzate, e superiormente dall'effetto della capacità esistente fra gli elettrodi del dispositivo.

Rispetto a quelli a led, i visualizzatori a LCD hanno la caratteristica di funzionare con tensioni e correnti di pilotaggio estremamente basse, e di conseguenza di consumare pochissima energia. Inoltre, poiché i segmenti del visualizzatore possono assumere qualsiasi forma e dimensione, è possibile realizzare dispositivi personalizzati contenenti cifre, lettere, segni e simboli grafici, figure (▸ ***Fig. 4.24***).

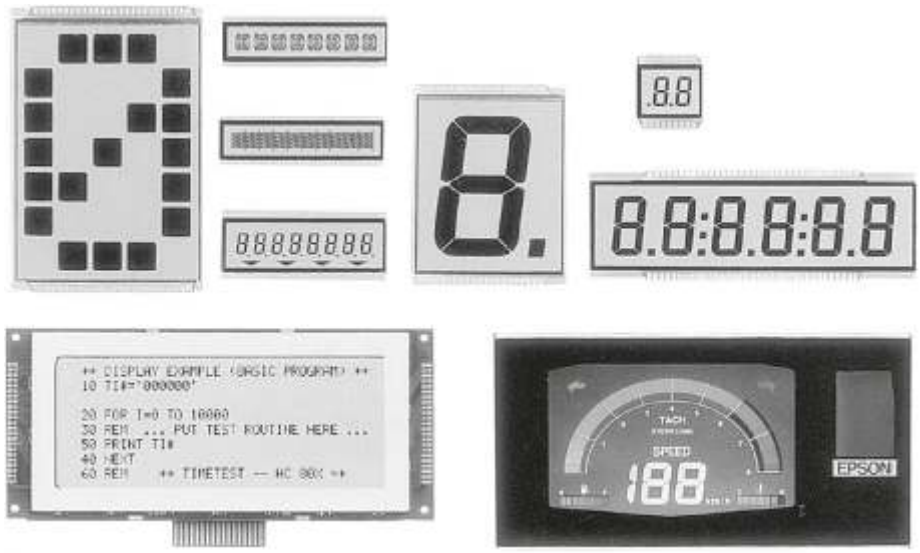
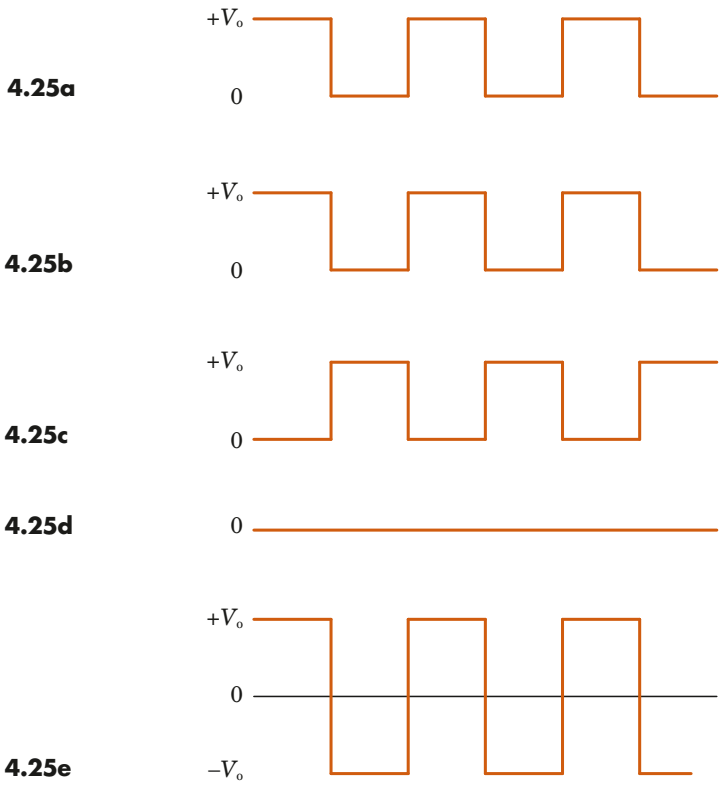


Fig. 4.24
Display a LCD.

Per il processo di distribuzione (indirizzamento) dei segnali da inviare al display tradizionale a 7-segmenti, o ai pixel che devono essere illuminati per ricostruire un'immagine sullo schermo, si possono utilizzare due metodi: l'indirizzamento diretto e l'indirizzamento indiretto o a multiplexer.

- L'**indirizzamento diretto** è utilizzato nei display con basso numero di pixel o di segmenti e prevede la presenza di un circuito di pilotaggio indipendente per ciascun segmento o pixel. Il display è pilotato con segnali a onda quadra utilizzando la tecnica detta **a commutazione di fase** (*phase switching*) descritta nelle ***figure 4.25a-e***. Uno dei segnali di fase è applicato all'elettrodo comune posteriore (*backplane*), mentre a ciascun segmento viene applicato un segnale in opposizione di fase, se si desidera attivare il segmento, o un segnale in fase, se si desidera spegnerlo. Lo schema della ***figura 4.26*** rappresenta il circuito di pilotaggio di un display LCD realizzato utilizzando porte logiche OR-Esclusivo; i segmenti selezionati ricevono una tensione pari al doppio di quella di alimentazione, mentre quelli non selezionati hanno ai loro capi una tensione nulla.

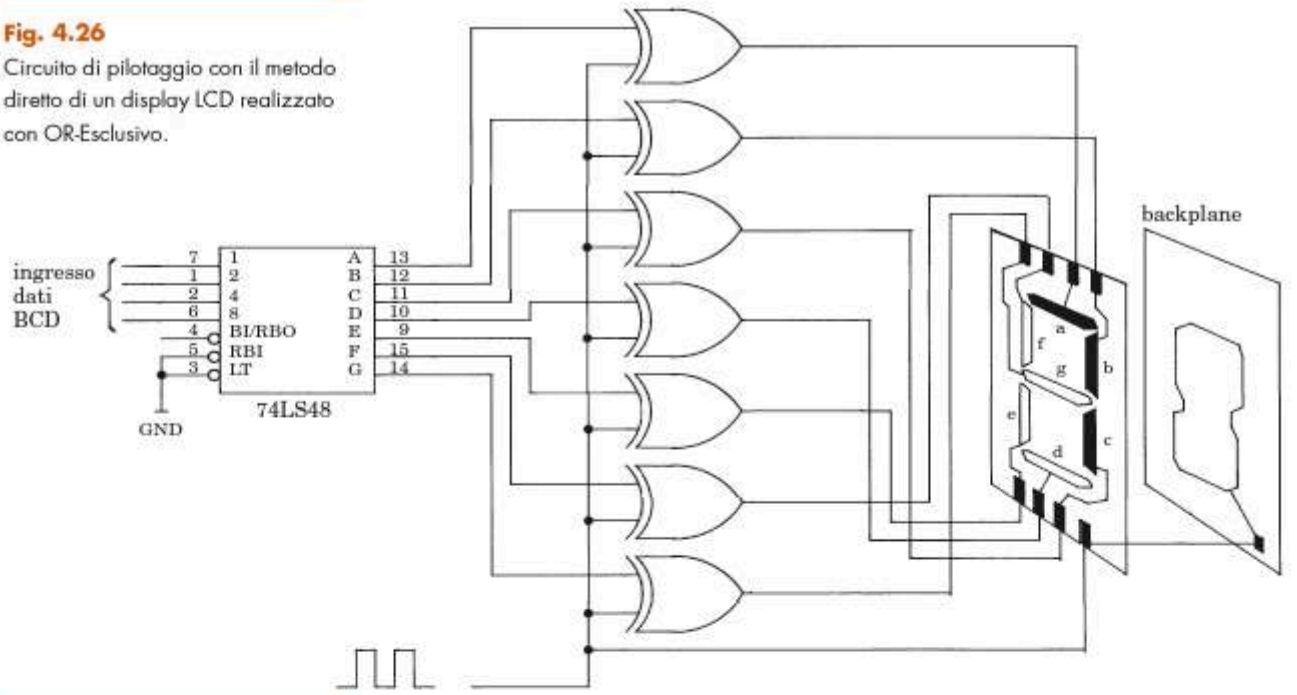
  L'indirizzamento diretto prevede l'uso di numerosi collegamenti per cui non può essere utilizzato nei display di grande dimensione.



Figg. 4.25a-e
Tecnica della commutazione di fase usata per il pilotaggio con il metodo diretto di un display LCD:
a. elettrodo comune backplane;
b. segmento spento;
c. segmenti attivati;
d. tensione risultante a segmenti spenti;
e. tensione risultante a segmenti attivati.

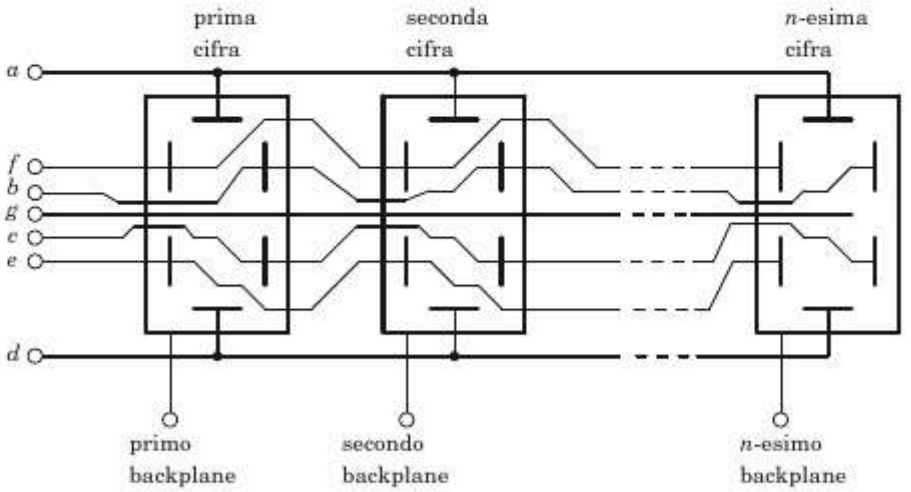
- L'inconveniente può essere eliminato con la tecnica di **indirizzamento indiretto** o **a multiplexer** (detta anche **a matrice**). Questa tecnica usa uno schema di coordinate *x-y* nel quale i segmenti o i pixel sono collegati fra due insiemi di conduttori ortogonali disposti in righe e colonne. Per attivare i segmenti desiderati si applicano segnali appropriati alle righe e alle colonne dei segmenti selezionati ma, a differenza di quanto avviene nel metodo diretto, sono indirizzati in sequenza anziché simultaneamente.

Fig. 4.26
Circuito di pilotaggio con il metodo diretto di un display LCD realizzato con OR-Esclusivo.



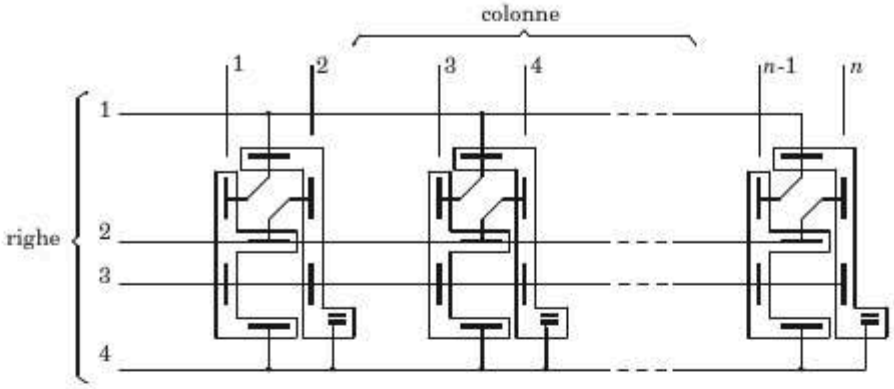
La tecnica a multiplexer può essere applicata in modo completo (*full*) o intermedio (*intermediate*). Nel primo caso è necessario un numero di collegamenti pari alla somma delle m righe e delle n colonne della matrice; nel secondo caso il numero delle connessioni varierà da $m + n$ a $m \cdot n$, a seconda del tipo di schema di connessione adottato. Lo schema a multiplexer completo è mostrato nella ***figura 4.27***; le cifre del display vengono attivate sequenzialmente indirizzando i backplane uno alla volta.

Fig. 4.27
Metodo di pilotaggio a multiplexer completo (full).



La ***figura 4.28*** mostra un display connesso con il metodo multiplex *intermediate*; i segmenti sono connessi a coppie e il backplane è suddiviso in due parti in modo tale che i segmenti di ciascuna coppia appartengano a due diversi backplane. In pratica ogni display è considerato una matrice. Notiamo che il numero dei collegamenti necessari per pilotare il display LCD è maggiore di quello che caratterizza la tecnica a multiplexer completo.

Fig. 4.28
Metodi di pilotaggio a multiplexer intermediate 4 × 3.



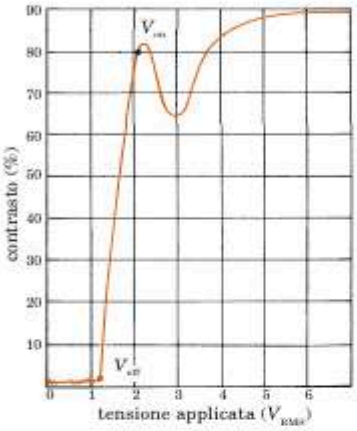


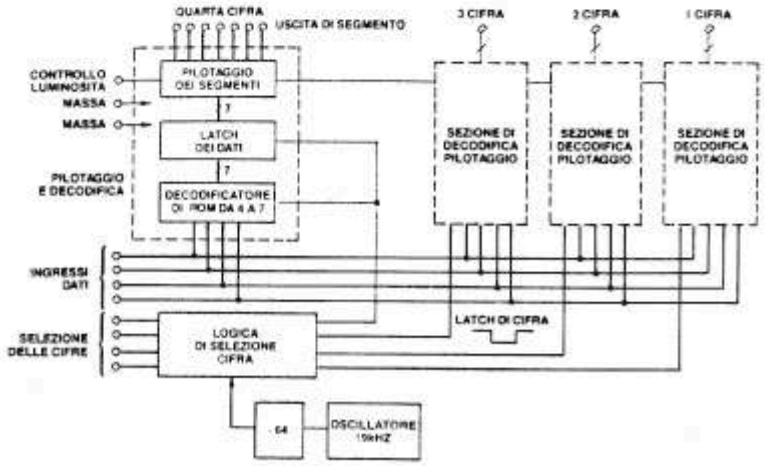
Fig. 4.29
Andamento della curva contrasto-tensione di polarizzazione per un display LCD del tipo TN.

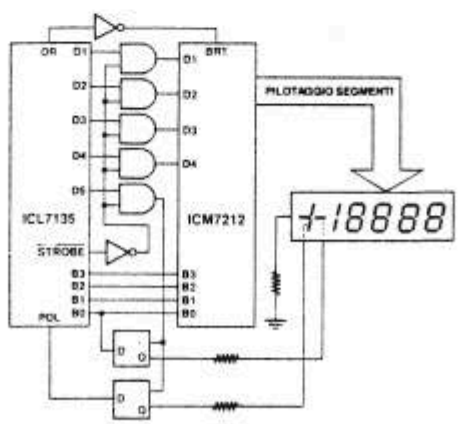
Quella mostrata è solo una delle possibili configurazioni; il display, infatti, può anche essere organizzato con una matrice 3 × 3 nella quale ogni cifra è divisa in una matrice di tre righe e tre colonne, con le righe delle altre cifre in parallelo e le colonne indipendenti fra le varie cifre.

Il pilotaggio dei display LCD è dunque effettuato con tecniche di multiplexing che consentono di ridurre il numero e la complessità dei dispositivi elettronici da utilizzare. Questa tecnica di pilotaggio comporta un peggioramento della visibilità perché provoca la riduzione del contrasto e dell'angolo di visuale del display. Per ridurre questi inconvenienti si impiegano liquidi nematici a contrasto elevato, oppure si aggiunge al liquido una sostanza costituita da particelle dicroiche in sospensione, detta *dye*, la quale, aumentando l'assorbimento della luce in assenza di polarizzazione, migliora il rapporto di trasmissibilità negli stati di on/off. Tale tecnica, che peggiora leggermente la trasparenza del display nella condizione di on e rallenta i tempi di commutazione, viene applicata per realizzare display a colori caratterizzati da una buona risoluzione.

La scelta di un display LCD adatto a essere pilotato con la tecnica del multiplexing viene fatta valutando sulla curva caratteristica contrasto-tensione di polarizzazione (▸ ***Fig. 4.29***) il rapporto $V_{(on)}/V_{(off)}$, che dev'essere il più elevato possibile. La complessità dei circuiti utilizzati per pilotare questo tipo di display è illustrata nella ***figura 4.30***, che mostra lo schema a blocchi di un circuito integrato, l'ICM7212/7212A prodotto dalla Intersil, in grado di pilotare in modo statico un display LCD a quattro cifre.

Fig. 4.30
Schema a blocchi del circuito integrato ICM7212; il dispositivo è in grado di pilotare in modo statico un display LCD (*fonte*: Intersil).





I visualizzatori LCD non sono sempre di facile lettura perché la loro leggibilità dipende dall'illuminazione ambientale e per essere letti al buio richiedono una sorgente di luce ausiliaria a led. Trovano largo impiego nelle apparecchiature elettroniche alimentate a batteria (calcolatrici, orologi digitali, strumenti portatili, giochi elettronici, computer, televisori).

PER FISSARE I CONCETTI

1. Che cos'è un display a diodi elettroluminescenti?
2. Qual è il principio di funzionamento di un display a cristalli liquidi?
3. Che cos'è la mesofase?

3 VISUALIZZATORI A SCARICA

Nei **visualizzatori a scarica nei gas**, o **a fluorescenza**, la generazione dei caratteri è ottenuta sfruttando la ionizzazione di un gas (neon) o il fenomeno della fluorescenza provocato dall'urto degli elettroni contro una superficie opportunamente trattata.

Display a fluorescenza

VFD
– Vacuum fluorescent display

I display fluorescenti sottovuoto **(VFD)** sfruttano l'elettroluminescenza, fenomeno che si produce per effetto della transizione degli elettroni fra stati quantici caratterizzati da differenti livelli di energia: essa è infatti associata al decadimento di un elettrone dal livello quantico eccitato, ad alta energia, a un livello a più bassa energia. L'eccitazione dell'elettrone è ottenuta applicando un campo elettrico di intensità appropriata. I materiali luminescenti sono formati da cristalli di solfuro di zinco, un materiale semiconduttore, drogato con sali di rame o di manganese.

La ***figura 4.31*** mostra la struttura di un display elettroluminescente. I conduttori, lo strato isolante, l'anodo e lo strato elettroluminescente sono

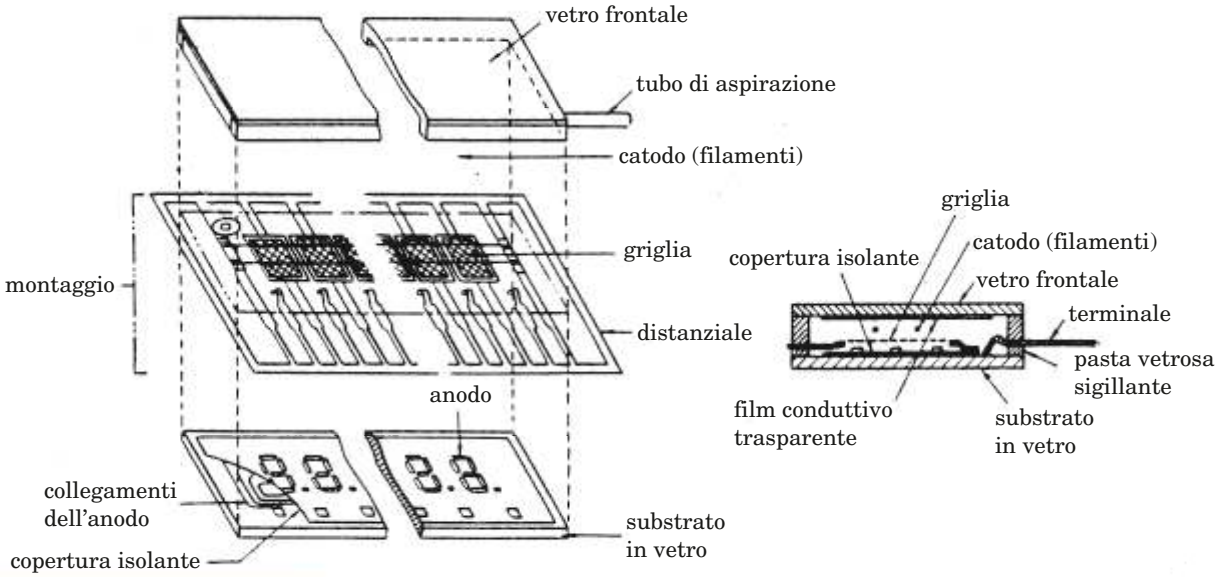


Fig. 4.31
Struttura di un display elettroluminescente.

deposti con il processo di deposizione a film sul substrato anodico di vetro. Sopra di essi sono posati la griglia e i filamenti del catodo, e il tutto viene poi racchiuso e sigillato in un contenitore ermetico sottovuoto; le due parti sono saldate con una pasta di vetro a basso punto di fusione.

I filamenti catodici sono portati, con una corrente appropriata, a una temperatura di 600 °C, provocando l'emissione di elettroni. La tensione anodica viene applicata in modo da attivare solo i segmenti che corrispondono alle cifre o alle immagini che si vogliono visualizzare; contemporaneamente, un'analoga tensione positiva viene applicata alle stesse zone della griglia. Gli elettroni emessi dal catodo, accelerati dall'anodo e dalla griglia, vanno a colpire il materiale fluorescente, deposto in corrispondenza dei segmenti anodici selezionati, e lo eccitano, portandolo alla luminescenza. Nelle aree selezionate si ha quindi l'emissione, da parte del materiale luminescente, di una radiazione luminosa che evidenzia il carattere o l'immagine desiderati.

Il meccanismo dell'elettroluminescenza può essere così descritto:

— iniezione dei portatori nel semiconduttore;
— accelerazione dei portatori per mezzo di un intenso campo elettrico esterno;
— eccitazione diretta dei centri luminescenti;
— quando l'energia cinetica è pari o superiore a quella di ionizzazione dei centri luminescenti, rilassamento allo stato fondamentale con l'emissione luminosa.

I display luminescenti possono fornire immagini chiare, brillanti e dotate di un'eccellente visibilità, di un'elevata velocità di commutazione acceso-spento, di un ampio angolo di lettura e di un elevato contrasto.

Display a plasma

Il termine **plasma** indica uno stato della materia in cui coesistono particelle con carica positiva e altre con carica negativa, ma che globalmente risulta essere neutro. Il display a plasma **(PDP)** produce l'emissione luminosa grazie a un neon gassoso allo stato molecolare: un certo numero di elettrodi è disposto orizzontalmente e verticalmente sullo schermo in modo da formare una griglia; i punti di incrocio sono accessibili selezionando in modo opportuno gli elettrodi orizzontali e verticali.

PDP
– Plasma display panel

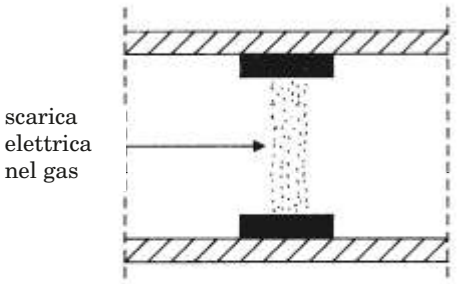
Gli elettrodi orizzontali sono attivati in sequenza dall'alto verso il basso a una frequenza di 60 cicli al secondo; con la stessa frequenza l'informazione viene inviata agli elettrodi anodici, che attivandosi generano nella propria cella una scarica elettrica che ionizza il gas. Il gas ionizzato dà luogo a un'emissione luminosa visibile dall'esterno attraverso l'elettrodo anodico trasparente. La combinazione dei vari punti (*pixel*) illuminati, forma l'immagine che si vuole visualizzare.

I display a plasma possono funzionare in corrente continua e in corrente alternata (◗ ***Figg. 4.32a, b***).

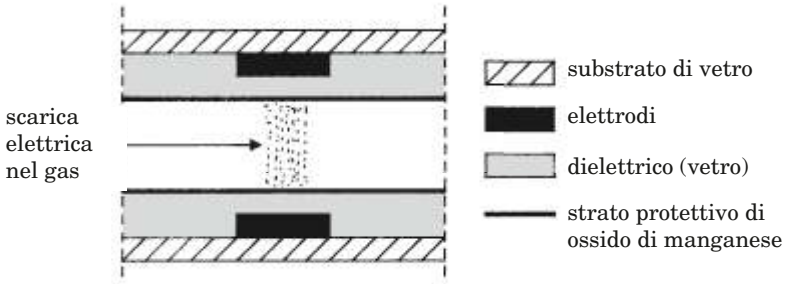
Nel primo caso, gli elettrodi sono esposti al neon gassoso e la scarica elettrica viene mantenuta per tutto il tempo di applicazione del campo elettrico; il circuito di pilotaggio è quindi semplice. Questo modello di visualizzatore viene impiegato per realizzare schermi a colori.

Figg. 4.32a, b
Display a plasma:
a. in corrente continua;
b. in corrente alternata.

Nel secondo caso, gli elettrodi sono ricoperti da un sottile strato protettivo di dielettrico (ossido di manganese); la scarica si ottiene applicando un campo elettrico e si interrompe non appena viene applicato un campo elettrico di polarità opposta: il circuito di comando è dunque complesso. Questi visualizzatori sono caratterizzati da un elevato grado di luminosità.



4.32a

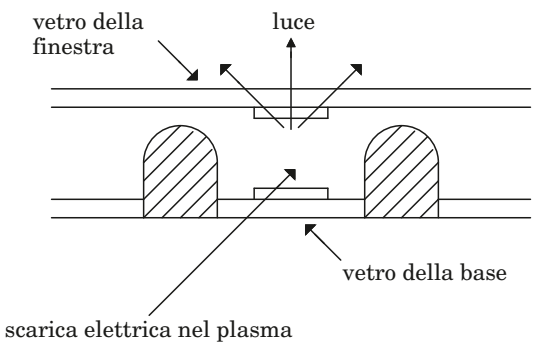


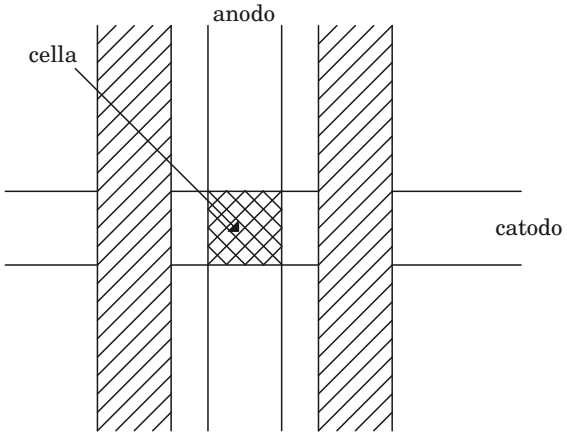
4.32b

Fig. 4.33
Struttura di un display a plasma.

pareti di divisione delle celle

La ***figura 4.33*** mostra la struttura di un display a plasma; si notano le due superfici di vetro, superiore e inferiore, le pareti di divisione delle celle, i due elettrodi (anodo e catodo). Il gas utilizzato è il neon miscelato con argo e xeno. L'anodo dev'essere trasparente per permettere il passaggio della luce prodotta dalla scarica.





4 DIODI LASER

Il laser è un dispositivo che produce e per stimolazione emette una radiazione luminosa coerente con una lunghezza d'onda compresa fra 100 nm e 1,6 μm. Una radiazione luminosa è detta *coerente* quando è costituita da **fotoni** (quanti elementari di luce) emessi da una sorgente a intervalli di tempo regolari, lungo la medesima direzione, senza sfasamento relativo e che giacciono sullo stesso piano di polarizzazione.

Principio di funzionamento

Le radiazioni luminose vengono assorbite o emesse da un corpo in funzione delle transizioni degli elettroni fra i vari livelli, o orbite, della struttura atomica. Il passaggio di un elettrone da un orbitale più esterno, a maggiore energia E_n, a un orbitale più interno a minore energia E_{n-1}, libera un

fotone generando l'emissione temporanea di una radiazione alla frequenza f (▸ ***Figg. 4.34a, b***):

$$f = \frac{E_n - E_{n-1}}{h} \qquad 4.1$$

e di lunghezza d'onda:

$$\lambda = \frac{h\,c}{E_n - E_{n-1}}$$

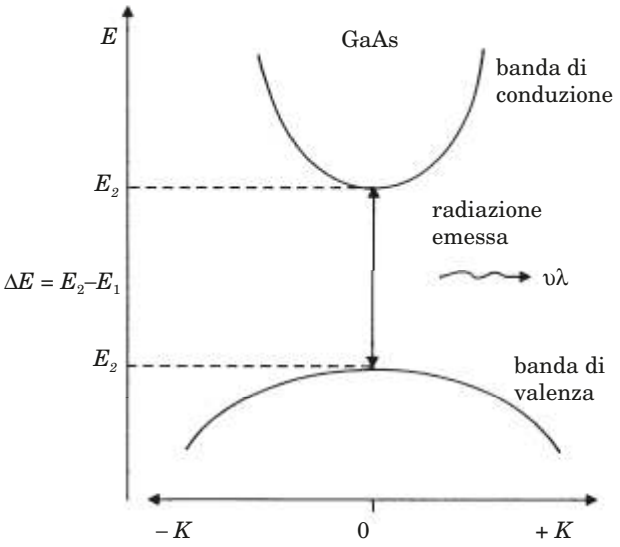
dove

h è la costante di Planck $h = 6{,}6 \times 10^{-34}$ J·s = $4{,}135 \times 10^{-15}$ eV·s

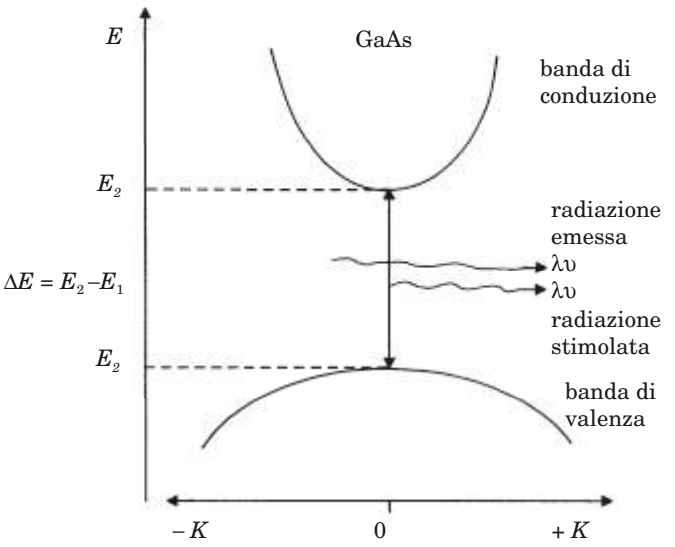
c è la velocità della luce $c = 300 \times 10^{6}$ m/s

Il passaggio da un livello energetico più alto a uno più basso può avvenire in modo spontaneo (**emissione spontanea** o **fluorescenza**) o come conseguenza dell'applicazione di una radiazione esterna (**emissione forzata** o **stimolata**).

Figg. 4.34a, b:
a. emissione spontanea;
b. emissione stimolata.



4.34a



4.34b

Il passaggio di un elettrone, per effetto di una radiazione fornita dall'esterno, da un orbitale interno a uno esterno, viene definito **assorbimento** e può avvenire solo se la radiazione incidente ha una frequenza che soddisfa la relazione (4.1) per una qualsiasi combinazione dei livelli energetici. Molti materiali possiedono livelli energetici molto distribuiti, per cui il fenomeno può avvenire a qualsiasi lunghezza d'onda.

Affinché un corpo possa emettere radiazioni è quindi necessario che esistano elettroni risiedenti in orbitali ad alta energia che decadano, emettendo fotoni, in orbitali a minore energia. Per ottenere elettroni in numero eccedente a quello teorico di un orbitale occorre spostarli dagli orbitali più interni verso quelli esterni fornendo loro, attraverso una radiazione esterna, un'energia sufficiente a provocarne la migrazione. Nell'equilibrio termico, il numero di elettroni presenti nella banda di valenza (a minore energia) è maggiore di quelli presenti nella banda di conduzione. In queste condizioni la probabilità che un fotone incidente sia

assorbito è notevolmente superiore rispetto a quella che si verifichi un'emissione stimolata.

Affinché un fotone incidente possa liberare un nuovo fotone, invece che essere assorbito, è necessario che il numero di elettroni (**popolazione**) presente nei due livelli energetici sia invertito, cioè più del 50% degli elettroni si deve trovare nel livello energetico più elevato rispetto a quello normale. In questo caso è alta la probabilità che un fotone incidente, invece di essere assorbito, provochi l'emissione di un nuovo fotone che coincide con quello stimolante (che a sua volta non risente del processo) per quanto riguarda la lunghezza d'onda, la fase, la polarizzazione e la direzione di propagazione. Quando nel materiale si verifica questa situazione si è in presenza di un'emissione stimolata, dove vi è un processo netto di amplificazione della luce.

La ***figura 4.35*** mostra lo schema a blocchi di un laser a gas eccitato mediante una scarica elettrica.

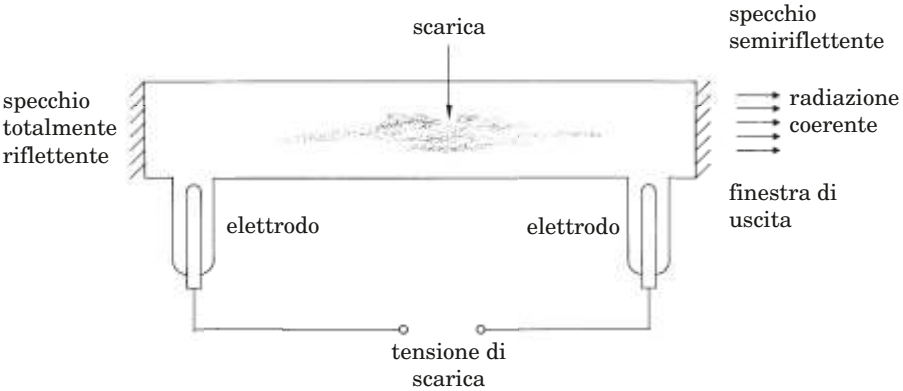


Fig. 4.35
Schema di principio di un diodo laser a gas eccitato da una scarica elettrica.

La scarica elettrica nel gas, provocata da un'adeguata differenza di potenziale applicata agli elettrodi, fa sì che una frazione consistente degli atomi del gas (60 ÷ 70%) si ecciti; in questa situazione l'emissione di una radiazione presenta un'elevata probabilità di interagire con altri atomi del gas e di eccitarli, provocando una nuova emissione. Si verifica un'**inversione di popolazione** rispetto alle condizioni di equilibrio, cioè gli atomi non eccitati sono solo una piccola frazione rispetto a quelli eccitati. Si ha quindi un processo di amplificazione della luce che si propaga lungo l'asse del tubo di confinamento del gas. I due specchi, piani e paralleli, posti alle estremità del tubo, riflettono il fascio luminoso facendolo rimbalzare. Questa coppia di specchi costituisce una cavità risonante nota in ottica come **interferometro di Fabry-Perot**.

La sola azione esterna di inversione della popolazione, cioè di modificazione della condizione di equilibrio, non è di per sé sufficiente a innescare il fenomeno dell'oscillazione. La cavità risonante (tubo di confinamento del gas e gli specchi) e l'accoppiamento ottico (specchio semiriflettente) con l'esterno producono notevoli perdite dovute ai fenomeni di diffrazione e di assorbimento della cavità stessa, e allo specchio che risulta solo parzialmente riflettente. È quindi necessario che il guadagno ottico superi le perdite entro la cavità: affinché il fenomeno dell'emissione stimolata possa autosostenersi, ci devono essere sempre nuovi elettroni allo stato superiore di eccitazione. Quando viene superato un valore limite, che dipende dalle caratteristiche geometriche della cavità risonante, una

porzione rilevante della radiazione lascia la cavità stessa attraversando lo specchio semitrasparente, e la parte restante viene riassorbita dal materiale attivo. Il raggio luminoso emesso ha la lunghezza d'onda caratteristica dell'energia di diseccitazione del materiale utilizzato.

Un laser è costituito dal materiale attivo, dal sistema di pompaggio e dal risonatore ottico.

Il **materiale attivo** è un materiale che possiede livelli energetici tali da interagire con la radiazione incidente dando luogo al fenomeno dell'emissione stimolata. Questo materiale può assumere forme e dimensioni molto varie e si può trovare nei tre stati: solido, liquido o gassoso.
L'eccitazione del materiale attivo viene ottenuta con vari metodi e il processo tecnologico utilizzato viene detto **sistema di pompaggio**. Nei laser a gas e a semiconduttore si impiega una scarica elettrica, mentre in quelli allo stato solido o liquido si utilizza la luce emessa da una lampada di intensità adeguata o da un altro laser (**pompaggio ottico**).

Il **risonatore ottico** è costituito da due o più specchi di varia forma (piana, sferica, parabolica).

L'emissione di una radiazione continua e coerente in un laser viene quindi provocata eccitando continuamente il materiale con una radiazione esterna che provvede a spostare gli elettroni dagli orbitali più interni a quelli più esterni.

Tale effetto viene ottenuto con risonatori ottici che, riflettendo le radiazioni emesse, producono ulteriori trasmigrazioni.

Caratteristiche fondamentali del fascio laser

Rispetto ai diodi fotoemittenti, le caratteristiche fondamentali di un raggio laser sono la direzionalità, la monocromaticità, la coerenza spaziale e temporale e la brillanza elevatissime.

La **direzionalità** della luce emessa dal diodo laser è dovuta al fatto che solo il fascio elettronico che si propaga in direzione perpendicolare agli specchi può entrare in oscillazione. La divergenza di un fascio laser è molto piccola, così come la diffrazione delle onde luminose, inevitabile in tutti i fenomeni di propagazione luminosa.

L'elevata **monocromaticità** deriva dal fatto che l'emissione stimolata in un certo materiale può avvenire solo alla lunghezza d'onda che corrisponde al salto energetico di diseccitazione degli atomi che lo compongono, e dalla cavità risonante che impone all'oscillazione di avvenire solo alla propria frequenza di risonanza. Il diodo laser è caratterizzato da una banda di frequenze di emissione strettissima, centrata attorno alla frequenza di oscillazione.

La **coerenza spaziale** di un fascio luminoso è definita come proprietà di possedere un fronte d'onda che non cambia nel tempo; indica l'attitudine del raggio a essere concentrato in un punto molto piccolo nel fuoco di una lente.

La **coerenza temporale** di un fascio laser è la correlazione esistente in ogni punto dello spazio fra due configurazioni dell'onda luminosa in due istanti diversi.

La **brillanza** di una sorgente luminosa è la potenza emessa per unità di superficie e per unità di angolo solido; si misura in $W/cm^2 \cdot st$ (steradiante). Tale parametro non dipende solo dalla potenza emessa, ma anche dall'angolo di divergenza.

Infatti, se si osservano da un'identica distanza la luce incoerente emessa da una lampadina e quella emessa da un laser di eguale potenza, la seconda apparirà più visibile e più brillante all'osservatore; questo avviene perché la luce incoerente si disperde nello spazio circostante in tutte le direzioni, per cui l'occhio dell'osservatore percepisce una piccola frazione della potenza del raggio emesso. Nel caso del raggio laser, la radiazione colpisce l'occhio con tutta la sua potenza facendo correre grossi rischi all'incolumità stessa dell'occhio.

Le apparecchiature laser sono realizzate con vari tipi di materiale; esistono laser a gas, a cristalli ionici, a semiconduttore e a liquidi.
I laser sono caratterizzati dai seguenti parametri:
— lunghezza d'onda della radiazione emessa (nm);
— potenza di picco (W);
— corrente di pompaggio o alimentazione (A);
— duty-cycle di lavoro (%).

La ***tabella 4.2*** elenca i valori caratteristici dei più importanti parametri e i campi di applicazione dei principali laser per applicazioni industriali.

Laser a semiconduttore

I laser a semiconduttore sono di dimensioni contenute e semplici da usare.

Per facilitare il processo dell'emissione stimolata occorre un'inversione dei portatori di carica per quanto riguarda banda di valenza e banda di conduzione, ossia bisogna aumentare notevolmente il numero degli elettroni nella banda di conduzione. Nei laser a semiconduttore questa inversione di popolazione viene ottenuta iniettando portatori di carica in un cristallo attivo, realizzato come giunzione PN. Per ottenere una occu-

Tabella 4.2 Caratteristiche dei laser per applicazioni industriali a confronto

LASER PER APPLICAZIONI INDUSTRIALI

Tipo di laser	Lunghezza d'onda (nm)	Efficienza tipica (%)	Potenza media tipica (mW)	Principali applicazioni
Argo	0,49 0,51	0,10	1 ÷ 50	fonte luminosa, olografia, spettroscopia, metrologia, taglio dei film
Cripto	0,64	0,10	0,25 ÷ 15	fonte luminosa, metrologia
Elio–neon (He–Ne)	0,633 1,15 3,39	0,01	0,001 ÷ 0,050	fonte luminosa, metrologia, trasmissione dei segnali
Rubino	0,69	1	1 ÷ 25	olografia, microlavorazioni
Neodimio (Nd–YAG)	1,06 1,30	3	0,5 ÷ 12	taglio, saldatura di piccoli spessori, microlavorazioni, spettroscopia
Anidride carbonica (CO_2)	10,60	15	3 ÷ 20000	taglio, saldatura, trattamenti termici

pazione sufficientemente elevata nella banda di conduzione occorre superare una corrente di iniezione minima, detta **corrente di soglia** I_{th}.

I portatori di carica tendono naturalmente a riportarsi ai livelli originari, liberando in cambio energia sotto forma di emissione di luce (fotoni) la cui lunghezza d'onda dipende dal materiale utilizzato e dalle dimensioni della cavità di risonanza. Finché la corrente diretta di iniezione circolante nella giunzione resta al di sotto del valore di soglia, il diodo laser si comporta come un diodo elettroluminescente, ossia si verifica solo l'emissione spontanea, ma quando il valore di soglia viene superato inizia l'emissione stimolata e la potenza ottica emessa aumenta rapidamente.

La ***figura 4.36*** mostra la struttura semplificata di un diodo laser a semiconduttore in cui sono evidenziate: la zona denominata **regione attiva** e gli elementi che la delimitano, cioè le cavità speculari in senso longitudinale, l'eterostruttura in senso verticale e la struttura interna addizionale in senso laterale per limitare l'area della zona attiva. Osserviamo che la struttura del diodo è tale da consentire il confinamento dei portatori di carica (elettroni e lacune) e dell'onda ottica nella regione attiva attorno alla zona della giunzione PN, e la cavità ottica in una piccola regione del cristallo. Il confinamento verticale dello spessore di 0,1 ÷ 0,2 μm è garantito da una o due eterogiunzioni, mentre quello laterale influisce sul modo di oscillazione del laser riducendo o aumentando le emissioni a frequenze superiori e inferiori.

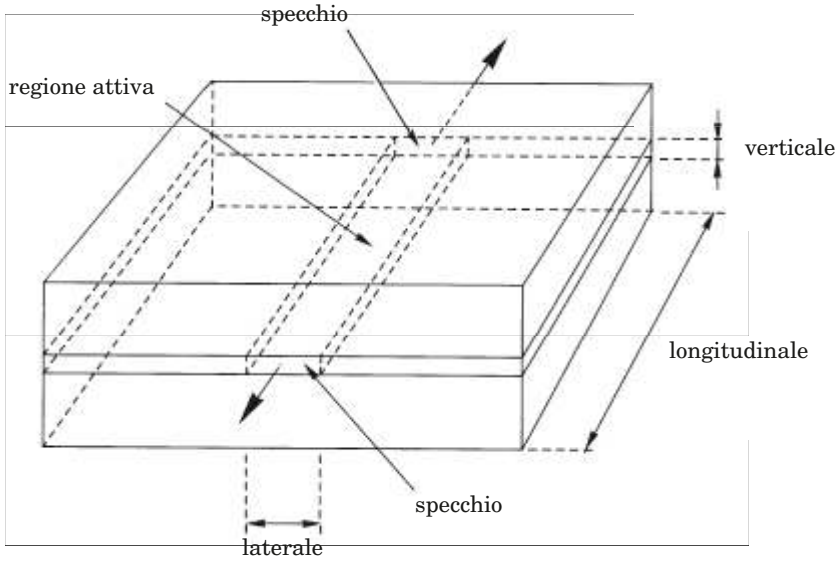


Fig. 4.36
Struttura semplificata di un diodo laser.

Le **eterostrutture** sono strutture cristalline costituite da sottilissimi strati (dello spessore di pochi diametri atomici) di differenti materiali semiconduttori. Una tipica eterostruttura, utilizzata per la realizzazione dei diodi laser, è quella formata dall'arseniuro di gallio e dall'arseniuro di gallio e di alluminio (la giunzione fra i due materiali è detta **eterogiunzione**). La formula generale dell'arseniuro di gallio e alluminio è $Al_xGa_{1-x}As$, con x compreso fra 0 e 1. Il simbolismo indica la frazione di sostituzione degli atomi di gallio con quelli di alluminio; per esempio, se la sostituzione è avvenuta al 40%, la formula del semiconduttore diviene: $Al_{0,4}Ga_{0,6}As$.

Nell'arseniuro di gallio e alluminio la distanza fra le bande è più

ampia di quella che si registra nell'arseniuro di gallio, ed è funzione crescente della percentuale di atomi di gallio sostituiti da quelli di alluminio.

Nella ***figura 4.37*** viene mostrata la struttura a bande dell'eterogiunzione P-P che si forma tra il substrato all'arseniuro di gallio e lo strato di arseniuro di gallio e alluminio. La maggiore energia di interbanda (*gap*) che caratterizza l'arseniuro di gallio e di alluminio crea nella banda di conduzione un gradino che agisce come barriera di potenziale in grado di riflettere gli elettroni; un'eventuale polarizzazione non modifica la struttura delle bande.

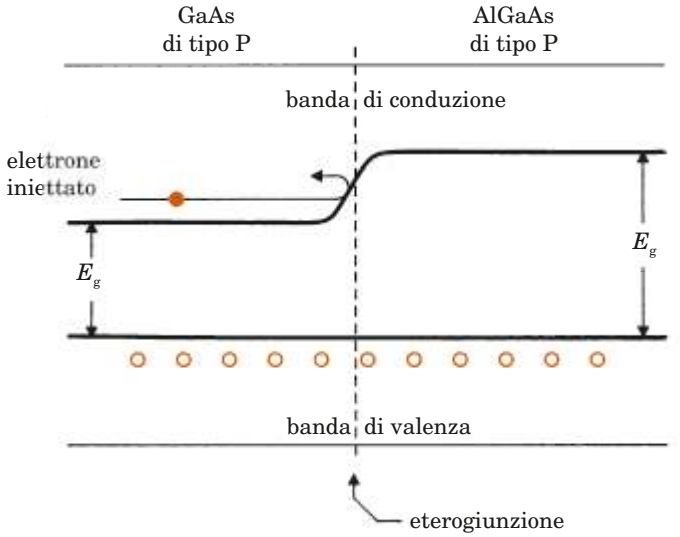


Fig. 4.37
Struttura a banda dell'eterostruttura P-P.

La ***figura 4.38*** mostra la struttura a bande dell'eterogiunzione che si forma tra il substrato all'arseniuro di gallio e alluminio drogato di tipo N e lo strato di arseniuro di gallio di tipo P. In assenza di polarizzazione le due bande sono piegate e non vi è conduzione, come avviene in tutte le giunzioni PN; applicando invece una tensione di polarizzazione diretta, l'energia di interbanda (*gap*) si riduce, ma sulla banda di valenza dell'eterogiunzione rimane una barriera di potenziale residua che impedisce alle lacune di attraversare l'eterogiunzione.

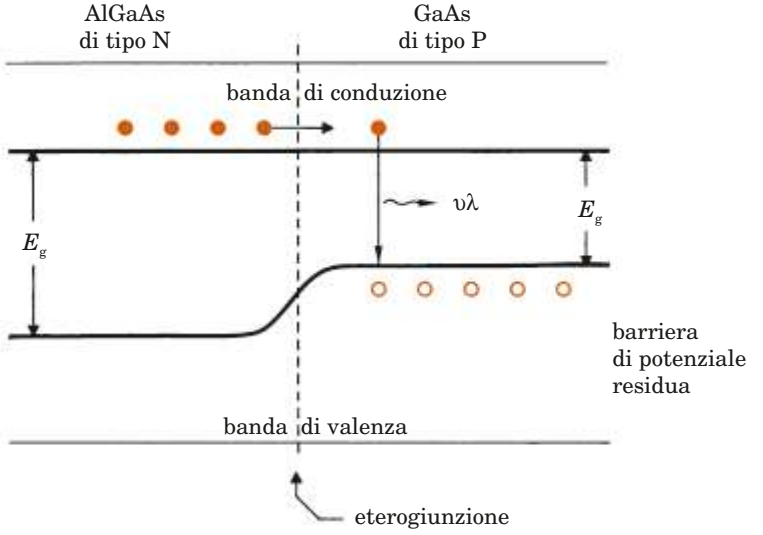


Fig. 4.38
Struttura a banda dell'eterostruttura P-N (polarizzazione diretta).

Le due eterogiunzioni sono quindi caratterizzate da un'energia di interbanda più elevata che porta alla formazione di barriere di potenziale che limitano gli elettroni e le lacune nella zona attiva; a causa della più elevata energia di interbanda, l'indice di rifrazione dell'arseniuro di gallio e di alluminio è minore di quello dell'arseniuro di gallio, per cui la zona attiva della giunzione si comporta come una guida dielettrica a strato simile a una fibra ottica.

Le **tecnologie costruttive** dei diodi laser sono suddivise in due grandi categorie, in funzione delle caratteristiche delle guide d'onda laterali:

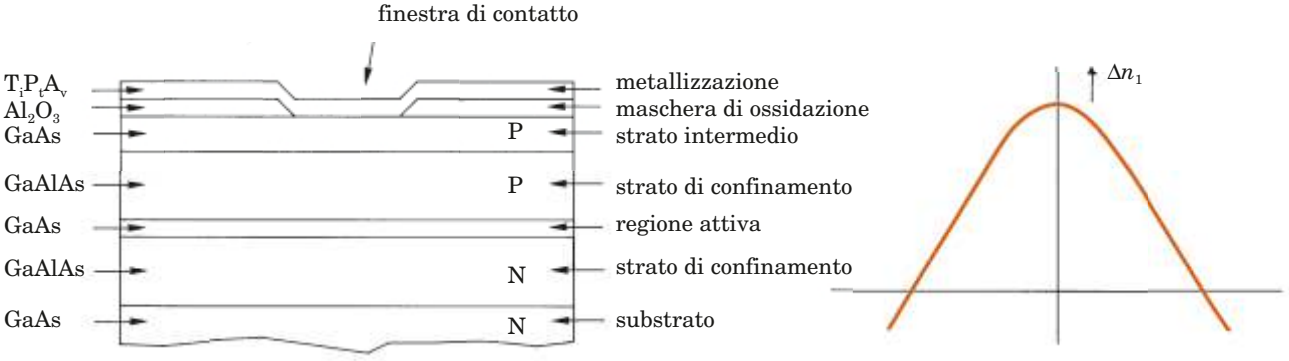
— a guida d'onda indotta dalla corrente **(GLD)**;

— a guida d'onda incorporata **(ILD)**.

GLD
– Gain guided laser diode
(diodo laser a guadagno guidato)

Nei diodi laser realizzati in **tecnologia GLD** (▸ ***Figg. 4.39a, b***), il percorso della corrente dovuto all'iniezione dei portatori di carica è confinato lateralmente dall'andamento della concentrazione dei portatori stessi. Si crea così un indice di rifrazione immaginario n_i il cui profilo genera una guida d'onda stabile per la lunghezza d'onda fondamentale. Al profilo dell'indice di rifrazione corrisponde un analogo profilo di guadagno ottico.

Figg. 4.39a, b
Struttura e meccanismo di guida d'onda di un diodo laser a tecnologia GLD:
a. struttura tecnologica;
b. curva caratteristica dell'indice di rifrazione.

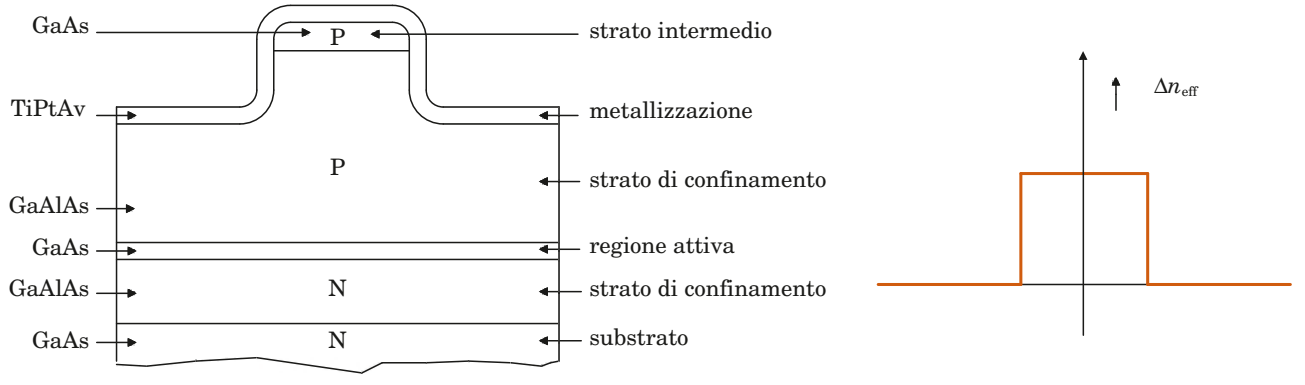


4.39a **4.39b**

Nella **tecnologia ILD**, il profilo dell'indice di rifrazione è invece stabilito durante il processo di fabbricazione ed è quindi fisso.

Il diodo laser **MCRW** (▸ ***Figg. 4.40a, b***) appartiene alla famiglia dei diodi ILD. La guida d'onda, ottenuta in sede di fabbricazione, è dovuta alla forma dello strato superiore di confinamento, che presenta una forma a gradino idonea a determinare un indice di rifrazione a salto brusco.

Figg. 4.40a, b
Struttura e meccanismo di guida d'onda di un diodo laser a tecnologia ILD:
a. struttura tecnologica;
b. curva caratteristica dell'indice di rifrazione.



4.40a **4.40b**

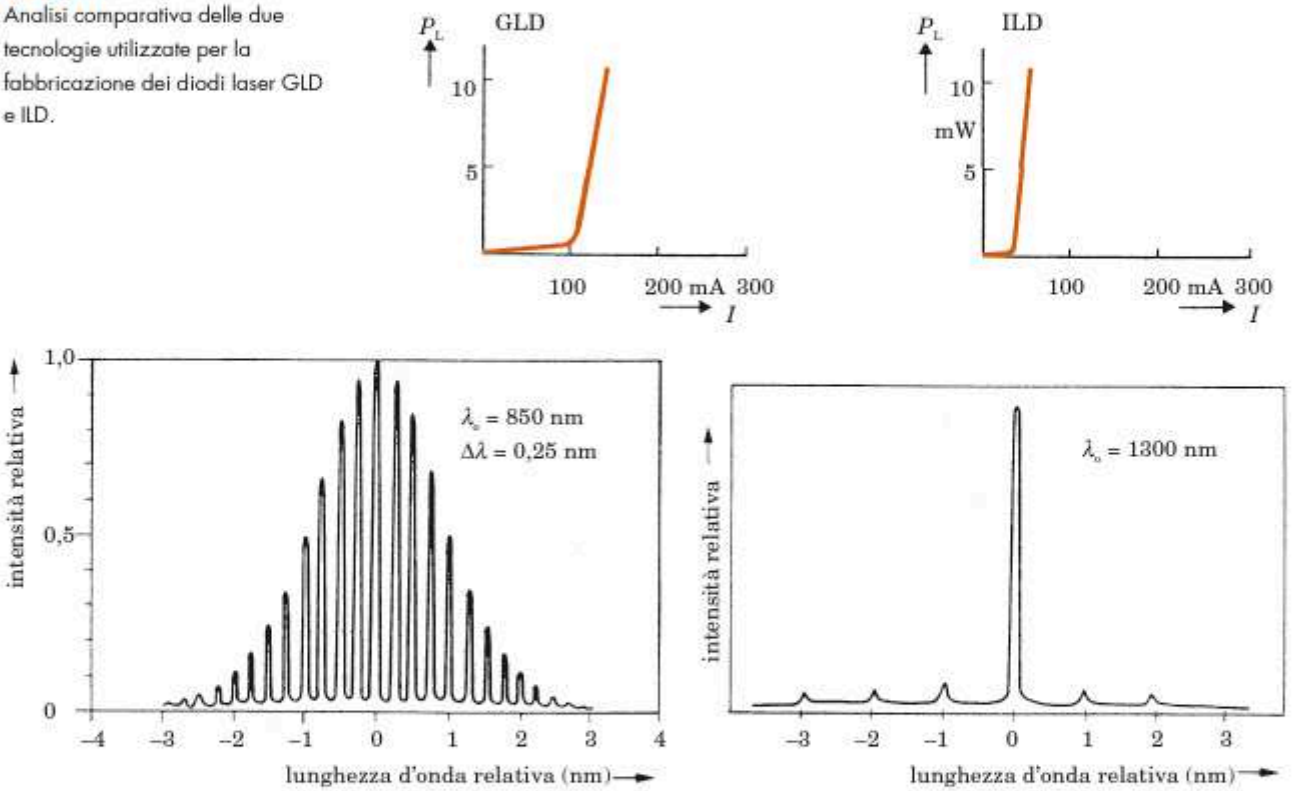
ILD
– Index guided laser diode (diodi laser a indice guidato)
MCRW
– Metal clad ridge waveguide (guida d'onda a cresta ricoperta di metallo)

La tabella inclusa nella ***figura 4.41*** permette di paragonare le caratteristiche delle due tecnologie ILD e GLD. I diodi laser ILD manifestano un rendimento potenza ottica iniettata-corrente superiore di almeno un fattore cinque rispetto a quella di un diodo laser GLD, e uno spettro di emissione più stretto.

La distanza fra due righe spettrali $\Delta\lambda$ dipende dalla lunghezza della cavità speculare L, dalla lunghezza d'onda centrale λ e dall'indice di rifrazione n secondo la seguente relazione:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2 \cdot L \cdot \left(n - \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda}\right)} \qquad 4.2$$

Fig. 4.41
Analisi comparativa delle due tecnologie utilizzate per la fabbricazione dei diodi laser GLD e ILD.



CARATTERISTICHE DEL LASER	GLD	ILD
Corrente di innesco (mA)	50-120	10-60
Astigmatismo	elevato	molto ridotto
Processo di fabbricazione	semplice	molto complicata

I diodi laser GLD sono multimodo, mentre quelli ILD sono monomodo.

Dall'analisi delle tabelle e dei grafici emerge la netta superiorità delle caratteristiche elettriche e ottiche dei diodi laser ILD; questi ultimi, però, non possono sostituire i diodi laser GLD perché sono molto più costosi.

I diodi laser a iniezione più sviluppati sono quelli a struttura ternaria ad arseniuro di gallio e alluminio a doppia eterogiunzione a striscia isolata (▸ ***Fig. 4.42***) realizzati in tecnologia GLD.

La zona attiva è costituita da un sottile strato di arseniuro di gallio (0,1 ÷ 0,3 µm) limitato dalle due eterogiunzioni con arseniuro di gallio e alluminio (di tipo N e P rispettivamente). Lo strato attivo è inserito fra questi due materiali, che hanno un gap di energia più elevato di quello dello strato attivo, e sono in grado di confinare in esso tutti i portatori di carica e i fotoni, il che determina l'elevatissimo rendimento ottico del dispositivo. Il confinamento dei fotoni è ottenuto sfruttando il fatto che le due eterogiunzioni che racchiudono lo strato attivo possiedono un indice di rifrazione più basso di quello dello strato attivo stesso, per cui i raggi luminosi subiscono, come accade nelle fibre ottiche fra nucleo e cladding, una riflessione totale verso il centro della striscia attiva stessa.

Lo strato di ossido, che ricopre parzialmente l'elettrodo d'oro costringe la corrente a passare in una sottile striscia dello strato di arseniuro di gallio. La corrente necessaria per il funzionamento del diodo assume quindi valori modesti: circa 100 mA. La luce viene emessa attraverso una sezione rettangolare lunga 10 µm e 0,1 ÷ 0,3 µm, e le dimensioni tipiche del chip sono di 300 × 300 µm (▸ Fig. 4.42).

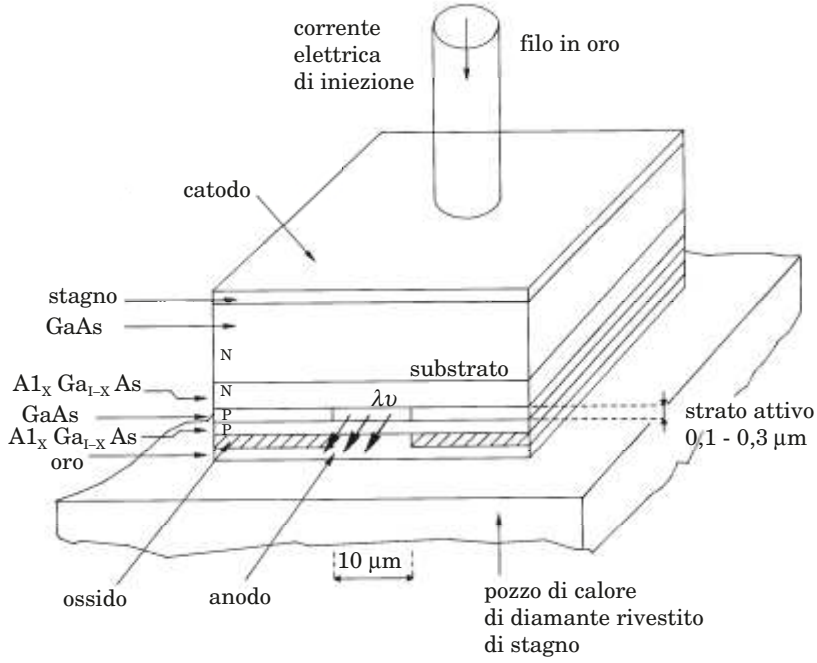


Fig. 4.42
Struttura tecnologica di un laser a semiconduttore AlGaAs a doppia eterogiunzione.

In un laser a semiconduttore, gli specchi naturali di elevata qualità che formano il risonatore ottico sono realizzati mediante un'operazione di clivaggio (sfaccettatura a specchio della superficie del cristallo) lungo il piano (110) a facce parallele del cristallo semiconduttore (▸ ***Vol. 1, Mod. A, Cap. 2***).

I fotoni generati dal processo di ricombinazione elettrone-lacuna all'interno della cavità possono essere riflessi all'interno di essa dando luogo alla formazione di altri fotoni coerenti, cioè con la stessa lunghezza d'onda e la stessa fase. Aumentando la corrente di iniezione al di sopra di

un valore detto **corrente di soglia** del laser (I_{th}), il guadagno nella cavità ottica supera le perdite e il dispositivo diventa un oscillatore; come conseguenza si ha l'emissione di una luce avente uno spettro di lunghezza d'onda molto stretto.

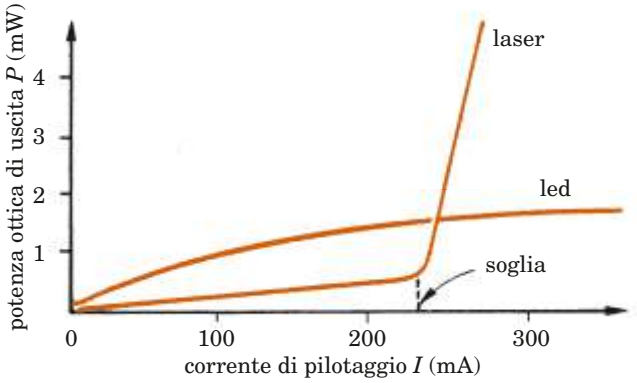
La lunghezza d'onda emessa, determinata esclusivamente dall'energia di gap posseduta dall'arseniuro di gallio e di alluminio, è centrata sugli 850 nm caratteristici della prima finestra di attenuazione delle fibre ottiche. I diodi laser realizzati con questa tecnologia sono caratterizzati da una corrente di soglia abbastanza elevata (≅ 100 mA), per cui si hanno perdite elevate con conseguente forte dissipazione di calore.

I diodi a tecnologia GLD sono caratterizzati da uno spettro di emissione abbastanza stretto, un'emissione stabile nel funzionamento continuo e in quello a impulsi, un basso coefficiente di temperatura e un basso costo di fabbricazione.

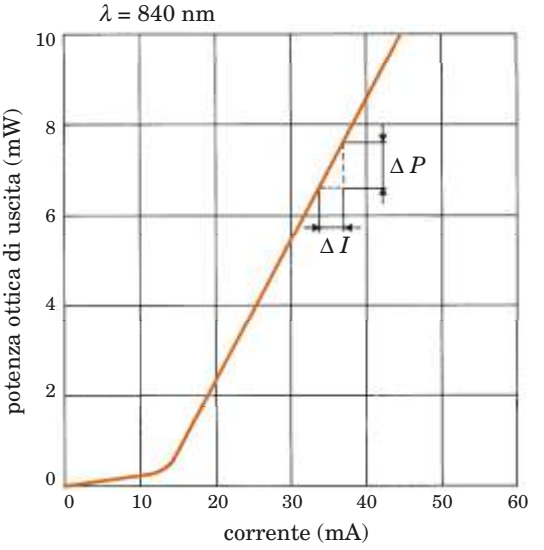
La ***figura 4.43*** mostra la curva tipica dei diodi laser, che pone in relazione la potenza ottica di uscita con la corrente di eccitazione. La pendenza di tale curva (▸ ***Fig. 4.44***) esprime il **rendimento quantico differenziale** η, un importante parametro che rappresenta il numero di fotoni prodotti da un certo numero di elettroni iniettati (preso come unità di misura).

Un laser di qualità sarà quindi caratterizzato da bassi valori di corrente di soglia e da rendimento quantico elevato.

Fig. 4.43
Curve potenza ottica-corrente diretta di un diodo laser e di un led (*fonte*: Pirelli).



4.43



4.44

Fig. 4.44
Definizione del rendimento quantico di un diodo laser.

rendimento quantico:

$$\eta = \frac{\Delta P}{\Delta I}$$

Dalla caratteristica si nota che, una volta superata la **corrente di soglia** (*lasing*), la potenza ottica aumenta in modo proporzionale all'aumento della corrente di iniezione, ciò significa che la relazione fra luce e corrente di iniezione è lineare; il diodo, una volta polarizzato opportunamente al disopra del valore di soglia, può essere modulato da una sorgente di segnale esterna (▸ ***Fig. 4.45***). Un diodo laser può essere modulato da segnali aventi frequenze molto elevate (dell'ordine di molti GHz).

I diodi laser più recenti sono realizzati utilizzando una struttura quaternaria arseniuro-fosfuro di indio-gallio a doppia eterogiunzione (InGaAsP) a tecnologia ILD, e sono quindi in grado di emettere una radia-

zione di lunghezza d'onda di 1300 nm. Questa frequenza è centrata sulla seconda finestra di attenuazione delle fibre ottiche, caratterizzata da perdite molto basse (< 1 dB).

I diodi ILD sono caratterizzati da una corrente di soglia molto bassa (< 20 mA) e da una purezza di emissione notevole.

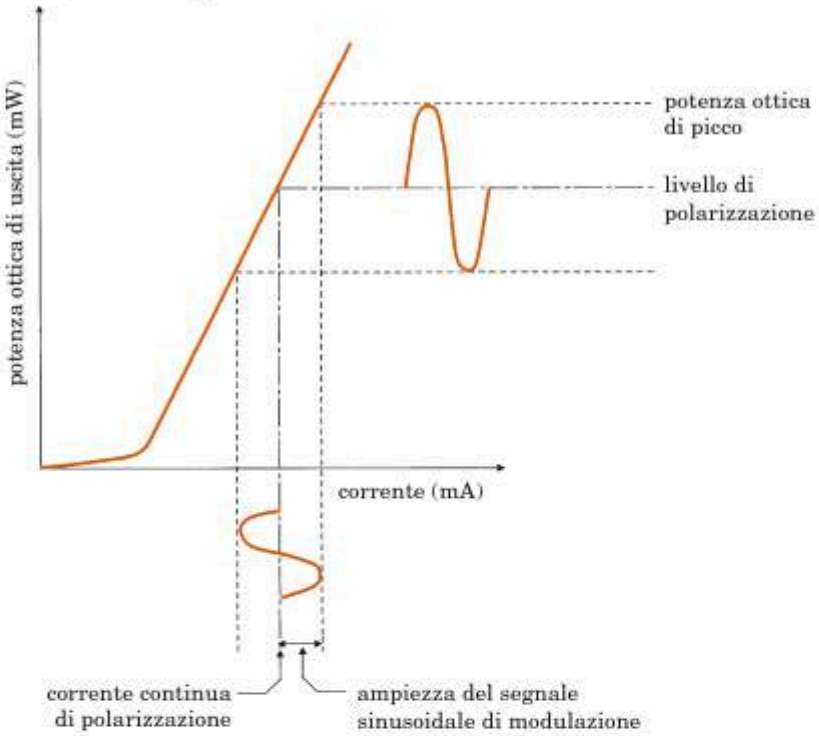


Fig. 4.45
Modulazione della potenza ottica generata tramite la corrente del segnale elettrico.

La ***figura 4.46*** mostra il modulo laser SFH408 prodotto dalla Siemens. Il modulo contiene il chip laser, l'ottica per l'interconnessione della fibra, un fotodiodo di misura (monitor), il termistore (sonda di temperatura) e un raffreddatore termoelettrico basato sull'effetto Peltier e la connessione chiamata, nella letteratura tecnica, *pigtail* (letteralmente: coda di porco). Questa connessione è costituita dal pezzo di fibra ottica che molti produttori, per facilitare il collegamento al cavo di fibra ottica vero e proprio, connettono sia al modulo trasmettitore, come in questo caso, sia al modulo ricevitore,

Il **fotodiodo** serve a stabilizzare il punto di lavoro ottico del dispositivo, misura la potenza ottica emessa e può quindi essere utilizzato per

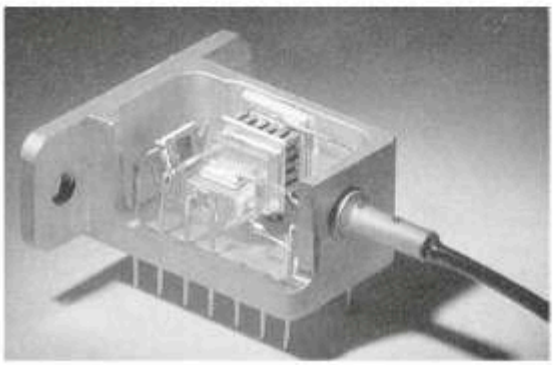


Fig. 4.46
Modulo laser SFH408 (*fonte*: Siemens).

Fig. 4.47
Porzione della superficie di un CD.

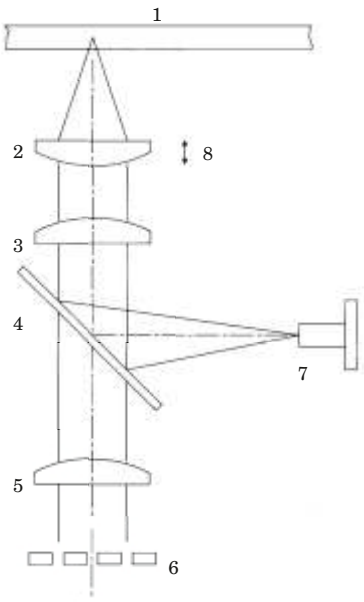


Fig. 4.48
Pick-up ottici per CD a singolo fascio luminoso.

1 disco (CD)
2 obiettivo
3 collimatore
4 specchio dicroico
5 prismi
6 fotodiodi
7 laser
8 movimento di messa a fuoco

controllare la potenza irradiata. La misura della temperatura effettuata tramite il **termistore** e l'azione del **raffreddatore Peltier** consentono, con un apposito circuito, di mantenere la temperatura del modulo costante a circa 20 °C, in modo da ottenere le condizioni di funzionamento ottimali per il dispositivo.

Applicazioni

I laser vengono impiegati in moltissimi campi tecnologici e in medicina.

Nelle apparecchiature per l'automazione dei processi industriali il laser viene impiegato per il taglio dei metalli, per la saldatura delle materie plastiche, per la misura delle dimensioni degli oggetti, per il riconoscimento dei corpi, per l'analisi delle deformazioni.

Nei sistemi di comunicazione a fibre ottiche il diodo laser viene utilizzato come sorgente della radiazione ottica del trasmettitore in alternativa ai diodi led.

Lettura dei dischi ottici digitali

Il diodo laser ha trovato spazio anche nell'elettronica di consumo nei sistemi per la lettura dei dischi ottici digitali.

Un disco ottico digitale, detto anche CD (*compact disk*), è costituito da un supporto plastico su cui viene incisa, descrivendo una serie di spirali lunghe 25 km e distanti fra loro 1,66 µm, una serie di pozzi alti 0,12 µm e larghi 0,6 µm (▸ ***Fig. 4.47***). Le informazioni sono lette con un sistema di scansione ottica, che utilizza un diodo laser per produrre un raggio luminoso che incide sulla superficie del disco nella direzione del solco, e un fotodiodo che riceve il raggio riflesso (▸ ***Fig. 4.48***). Il livello dell'intensità luminosa rilevata permette di discriminare i due livelli logici.

Queste apparecchiature utilizzano diodi laser allo stato solido a semiconduttore, che operano con basse tensioni e presentano ingombri ridottissimi (< 10 mm).

PER FISSARE I CONCETTI

1. Come funziona un diodo laser?
2. Quali sono le caratteristiche di un raggio laser?
3. Quali sono le principali applicazioni dei diodi laser?

CAP 5 FOTORIVELATORI

Concetti chiave

- Effetto fotovoltaico
- Corrente di buio
- Tensione di isolamento
- Rapporto di trasferimento di corrente

1 Fotodiodi
2 Celle fotovoltaiche
3 Fototransitor
4 Fototiristori
5 Fotoaccoppiatori

RISORSE ONLINE *Approfondimento: Realizzazione tecnologica dei fotodiodi*

Un dispositivo optoelettronico è un rivelatore quando l'onda elettromagnetica stimola modifiche nel suo comportamento elettrico. Sono **dispositivi rivelatori**:
— le fotoresistenze (LDR);
— i fotodiodi;
— le celle fotovoltaiche;
— i fototransistor e i fotodarlington;
— i fototiristori (fotoscr, fototriac).

Tutti questi dispositivi sono basati sul principio per cui una **radiazione incidente**, compresa in un certo campo di frequenze (infrarosso, visibile, ultravioletto), produce su una giunzione polarizzata inversamente un aumento delle coppie elettrone-lacuna, e di conseguenza un incremento dei portatori minoritari (elettroni per la zona P e lacune per la zona N).

Il campo elettrico dello strato di svuotamento separa gli elettroni dalle lacune provocando un incremento significativo della corrente inversa circolante. Tale corrente, per una certa densità del flusso radiante (misurato in W/cm^2), dipende dalla frequenza della radiazione incidente. In alternativa, la radiazione incidente può essere individuata anche utilizzando la lunghezza d'onda:

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad 5.1$$

dove:

$c = 2{,}99 \times 10^8$ m/s (velocità della luce)

Le **fotoresistenze** sono costituite da materiale semiconduttore di tipo N composto, come il solfuro di cadmio CdS o il solfuro di piombo PbS, oppure da materiali fotosensibili quali l'ossido di zinco o di selenio (▸ ***Vol. 1, Mod. B, Cap. 4***). Un sottile strato sinterizzato viene depositato fra due elettrodi metallici a forma di pettine in modo da ottenere la massima superficie sensibile possibile.

Quando una radiazione luminosa colpisce un materiale fotosensibile, l'energia dei fotoni incidenti viene assorbita dagli elettroni degli atomi, e di conseguenza si verifica un passaggio di questi a livelli di maggiore energia. Questo fenomeno genera un maggior numero di elettroni liberi, che si rendono disponibili per la conduzione. La resistenza dell'elemento dipende dalla superficie dell'elemento fotosensibile e dalla quantità di flusso lx (lux) incidente sull'unità di area, nonché da una costante adimensionale a e dalla costante K (Ω/lx) caratteristiche di ogni materiale e connesse alla tecnica costruttiva. La sensibilità spettrale di una fotoresistenza è determinata dalla composizione del materiale impiegato per costruirla; il picco di sensibilità per le fotoresistenze al solfuro di cadmio è intorno al rosso, per quelle al solfuro di piombo nel campo dell'infrarosso.

Le fotoresistenze sono robuste ed economiche, presentano una buona sensibilità, ma manifestano una risposta lenta alle variazioni di intensità luminosa e possono operare correttamente solo per bassi valori di temperatura. La resistenza varia da oltre un MΩ in condizioni di oscurità a poche decine di ohm con un'illuminazione di 1000 lx (per esempio, luce emessa da una lampada a incandescenza da 100 W a una distanza di 30 cm).

Le fotoresistenze possono essere alimentate sia in corrente continua sia in corrente alternata. Il loro principale difetto è la limitatissima banda passante, dovuta all'alto tempo di ricombinazione delle coppie elettrone-lacuna. Una fotoresistenza che viene oscurata dopo essere stata illuminata può impiegare anche qualche secondo per riassumere il valore posseduto in condizioni di oscurità. Il dispositivo non è quindi adatto per tutte quelle applicazioni, come la trasmissione dei dati, che richiedono un'elevata velocità di commutazione.

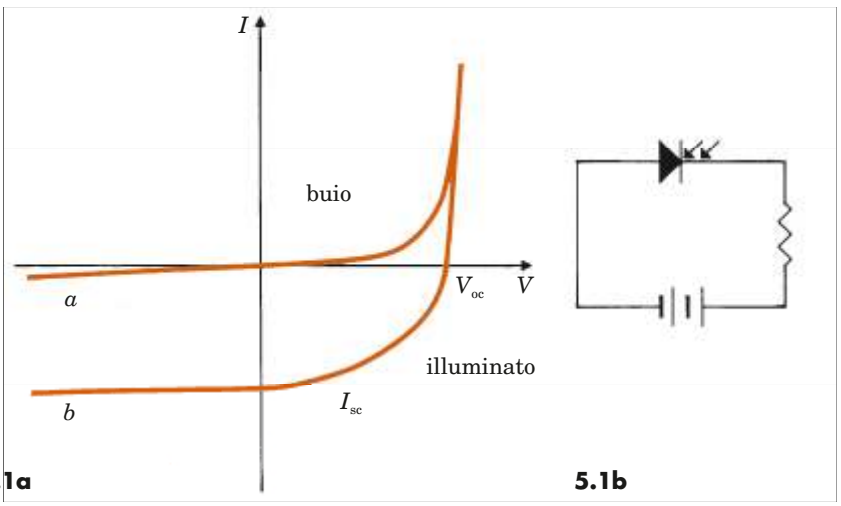
1 FOTODIODI

I fotodiodi sono diodi con un rivestimento plastico trasparente che permette alla luce di agire sulla giunzione polarizzata inversamente. Con il suo apporto energetico, la radiazione luminosa incidente incentiva la generazione delle coppie elettrone-lacuna nella zona di svuotamento e fa aumentare la concentrazione di cariche minoritarie (elettroni per la zona P e lacune per la zona N).

La radiazione incidente agisce dunque da **iniettore di portatori minoritari**. Il campo elettrico dello strato di svuotamento della giunzione separa gli elettroni dalle lacune dando origine a una corrente di cortocircuito, o tensione a circuito aperto (a vuoto), detta **effetto fotovoltaico**.

Caratteristiche elettriche

In assenza di radiazione incidente il fotodiodo si comporta come un normale diodo a giunzione e la sua caratteristica tensione-corrente passa per l'origine (▸ ***Fig. 5.1a***, curva *a*). In presenza di una radiazione luminosa applicata alla giunzione, per effetto della fotocorrente, che è prevalente rispetto alla corrente inversa di dispersione, la caratteristica tensione-corrente trasla verso il basso (▸ ***Fig. 5.1a***, curva *b*).



Figg. 5.1a, b
Caratteristica corrente-tensione di un fotodiodo:
a. in assenza di illuminazione;
b. in presenza di una radiazione luminosa incidente.

V_{oc} tensione di circuito aperto
I_{sc} corrente di corto circuito

Il fotodiodo presenta due differenti modi di funzionamento nel III e nel IV quadrante: nel III quadrante il dispositivo è polarizzato inversamente e viene utilizzato come **fotoconduttore**; nel IV quadrante il fotodiodo è utilizzato per convertire la potenza della radiazione incidente in potenza elettrica e quindi come **dispositivo fotovoltaico**.

I fogli tecnici riportano una serie di curve caratteristiche tracciate in funzione dell'intensità della radiazione incidente (W/cm^2) (▸ ***Fig. 5.2***).

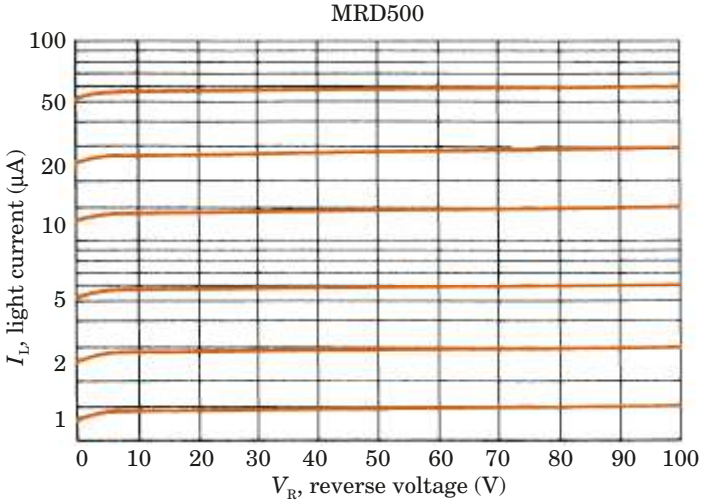


Fig. 5.2
Caratteristica voltamperometrica di uscita di un fotodiodo (*fonte*: Motorola).

La fotocorrente generata dall'effetto della radiazione incidente (I_p) varia in modo proporzionale alla densità del flusso incidente e la sua intensità dipende, oltre che dalla potenza, anche dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente (infrarosso, visibile, ultravioletto). La giunzione si comporta come un generatore di corrente costante fino a quando la tensione di polarizzazione inversa oltrepassa il ginocchio della curva inversa, dopo di che si crea un effetto valanga che danneggia il diodo.

La fotocorrente I_p viene calcolata utilizzando la seguente relazione:

$$I_p = \eta \cdot q \cdot \Phi \cdot A \qquad \textbf{5.2}$$

dove:

- η è il rendimento quantico (o efficienza quantica)
- q è la carica dell'elettrone ($q = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C)
- Φ è la densità del flusso dei fotoni (in fotoni/s/cm)
- A è l'area su cui incide il fascio luminoso (in cm^2)

Il **rendimento quantico** (o efficienza quantica) rappresenta il numero di coppie elettrone-lacuna generate da ogni elettrone incidente:

$$\eta = \frac{\dfrac{I_p}{q}}{\dfrac{P_{ottica}}{h \cdot \upsilon}} \qquad \textbf{5.3}$$

Un parametro che permette di valutare la risposta $\Re$ del fotodiodo è dato dal rapporto tra la corrente fotogenerata e la potenza ottica:

$$\Re = \frac{I_p}{P_{ottica}} = \frac{\eta \cdot q}{h \cdot \upsilon} = \frac{\eta \cdot \lambda}{124}\left[\frac{A}{W}\right] \qquad \textbf{5.4}$$

La lunghezza d'onda è espressa in μm. La relazione permette di osservare che, data una certa efficienza quantica, la risposta del fotodiodo incrementa con la lunghezza d'onda; tale parametro è limitato dal tempo di diffusione dei portatori nella zona di svuotamento e dall'effetto capacitivo di quest'ultima.

Per catturare quanta più energia luminosa possibile, le zone di svuotamento dei fotorilevatori devono essere relativamente larghe, ma in questo modo le capacità di giunzione assumono valori elevati.

La curva della risposta spettrale (◗ ***Fig. 5.3***) è usata per valutare le caratteristiche che la radiazione incidente deve possedere per conferire al fotodiodo una sensibilità elevata.

I parametri sono:

— I_D, che è la corrente continua massima;
— V_r, che è la tensione inversa di polarizzazione;
— V_{BDR}, che è la tensione inversa di rottura (*breakdown*) massima;
— I_d, che è la corrente di buio (*dark current*);
— P_d, che è la potenza dissipata;
— C_t, che è la capacità di giunzione;
— $S_{(\lambda = 0{,}8\ \mu m)}$, che è la sensibilità spettrale;
— λ_s, che è la lunghezza d'onda di massima sensibilità.

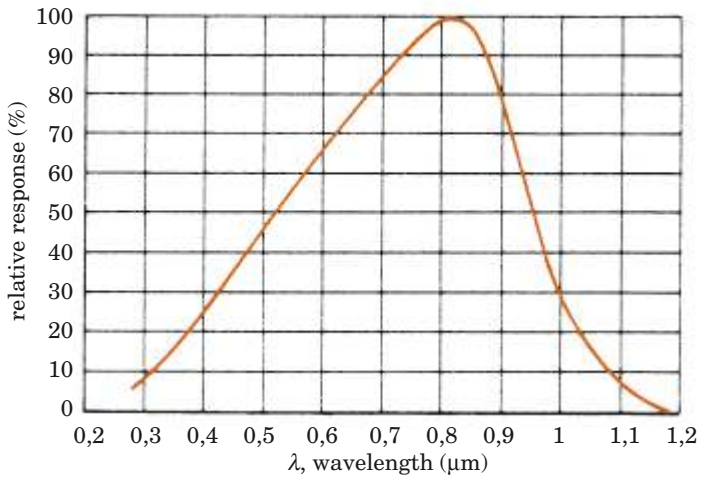


Fig. 5.3
Risposta relativa spettrale (*fonte*: Motorola).

La **corrente di buio** è la debole corrente di saturazione che fluisce nel diodo in assenza di radiazione. È creata dai portatori minoritari generati dal processo generazione-ricombinazione dovuto agli effetti termici e il suo valore tipico è dell'ordine di alcuni microampere.

La **sensibilità spettrale** è data dal rapporto fra corrente prodotta e potenza della radiazione incidente, e viene espressa in A/W o in A/lx. I valori tipici di corrente in un fotodiodo vanno dalle decine alle centinaia di microampere.

La **caratteristica dinamica** del fotodiodo utilizzato in commutazione viene definita nella letteratura tecnica da due parametri: il tempo di salita e il tempo di discesa. Questi tempi vengono misurati valutando il comportamento della variazione di corrente che scorre nel circuito di prova in risposta a un impulso luminoso. I valori tipici dei due tempi sono compresi fra 0,5 e 2 ns.

APD
– Avalanche photo diode

I rivelatori di uso più comune sono i fotodiodi PIN e i fotodiodi a valanga (APD). Il **fotodiodo** PIN è un diodo in cui i fotoni generano portatori di correnti elettriche con efficienze quantiche tipiche dell'80% e tempo di risposta inferiore a 1 ns; è costituito da una giunzione PN con interposta una zona di semiconduttore intrinseco (▸ ***Vol. 2, Mod. B, Cap. 2***).

La ***tabella 5.1*** mostra i valori di alcuni parametri significativi di diodi PIN.

Tabella 5.1 Parametri caratteristici dei fotodiodi PIN (tempo di risposta = 1 ns Typ)

DEVICE	LIGHT CURRENT @V_R = 20 V H = 5 mW/cm^2 µA	DARK CURRENT @V_R = 20 V nA (MAX)
MRD500	9	2
MRD510	2	2
MRD721	4	10
MRD821	250	60

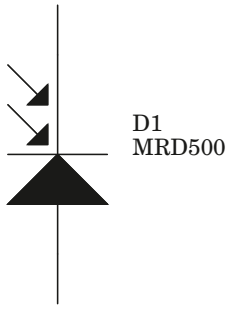


Fig. 5.4
Simbolo grafico di un fotodiodo.

Il **fotodiodo a valanga** ha una struttura simile a quella del fotodiodo PIN, viene però polarizzato inversamente con una tensione prossima al valore di breakdown.

In questo modo le coppie elettrone-lacuna che si creano nella regione di svuotamento sono accelerate e le loro collisioni con altri atomi portano alla creazione di nuove coppie elettrone-lacuna, che a loro volta vengono accelerate e creano nuove coppie. Si ha quindi un effetto di amplificazione del fenomeno di generazione delle coppie elettrone-lacuna che crea la corrente fotogenerata.

Rappresentazione grafica

Simbolo grafico e lettera di identificazione

Il fotodiodo viene disegnato come un diodo a giunzione con l'aggiunta di una o due frecce con la punta rivolta verso il simbolo che rappresentano la radiazione incidente (▸ ***Fig. 5.4***).

Le lettere di identificazione sono le stesse utilizzate per il diodo, cioè CR o D.

Sigla commerciale e tipo di contenitore

La sigla commerciale del fotodiodo viene stampigliata sul corpo del dispositivo ed è conforme alle norme che vengono utilizzate per i semiconduttori (▸ ***Vol. 2, Mod. B, Cap. 2***).

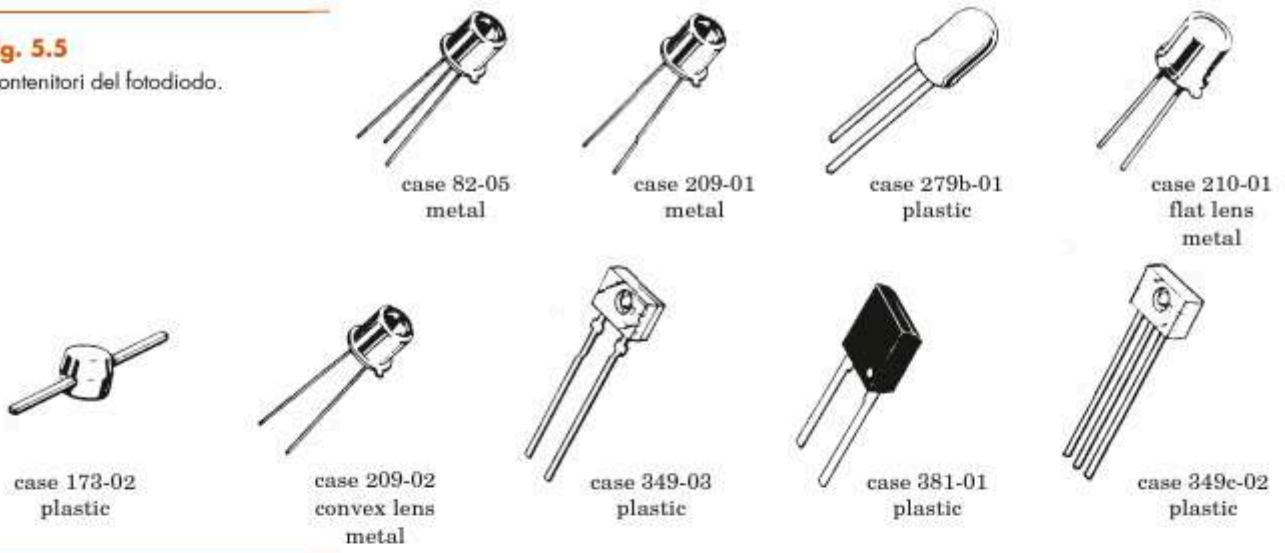
Il contenitore può essere in materiale plastico o in metallo ed è provvisto di una lente trasparente, in plastica o in vetro, che concentra la radiazione sulla giunzione.

La forma e le dimensioni sono simili a quelle dei diodi led o dei transistor di segnale (▸ ***Fig. 5.5***).

Applicazioni

Il fotodiodo viene utilizzato nelle apparecchiature di misura di intensità luminosa e come sensore nei circuiti di controllo della luminosità.

Fig. 5.5
Contenitori del fotodiodo.

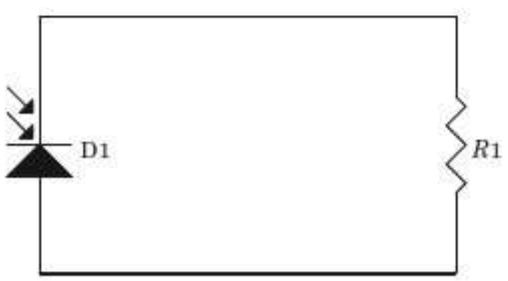


2 CELLE FOTOVOLTAICHE

Il fotodiodo della ***figura 5.6*** sfrutta l'effetto fotovoltaico per convertire l'energia luminosa assorbita in energia elettrica. In assenza di tensioni di polarizzazione esterne, nel fotodiodo scorre una corrente inversa data dalla somma della debole corrente di dispersione termica dovuta ai portatori minoritari e dalla fotocorrente. Questo funzionamento del diodo corrisponde a quello mostrato dalla caratteristica tensione-corrente nel IV quadrante (▸ ***Fig. 5.7***).

La tensione che appare ai capi di un fotodiodo a circuito aperto, a una data intensità della radiazione luminosa, è detta **forza elettromotrice fotovoltaica**. I valori tipici della tensione fotovoltaica dei fotodiodi al silicio sono compresi tra 0,35 e 0,5 V. La corrente ottenibile da una cella fotovoltaica dipende dalla resistenza di carico collegata ai suoi capi e dev'essere scelta per avere la massima potenza di uscita per una data illuminazione.

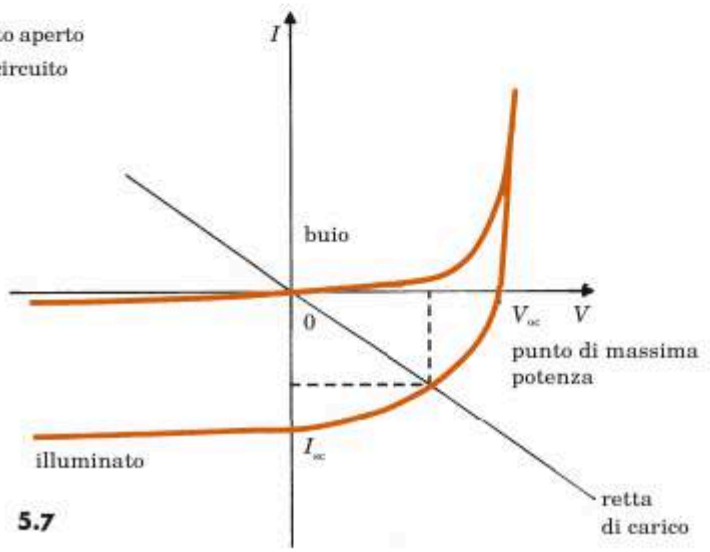
Fig. 5.6
Circuito applicativo di una cella fotovoltaica.



5.6

Fig. 5.7
Determinazione della tensione generata da una cella fotovoltaica in presenza di una radiazione di intensità nota.

V_{oc} tensione di circuito aperto
I_{cc} corrente di corto circuito



5.7

Celle solari

La cella solare è una forma ottimizzata del fotodiodo adattata a ricevere con grande efficienza la radiazione solare. Ha un'area molto estesa per raccogliere la massima quantità di radiazione incidente possibile.

Uno dei parametri elettrici che caratterizzano una cella solare è l'**efficienza di conversione**, definita dal rapporto fra la potenza elettrica ottenuta in uscita e la potenza della radiazione totale incidente in ingresso, espressa in percentuale (%).

I materiali utilizzati per le celle solari sono il silicio monocristallino, il silicio amorfo (policristallino) e l'arseniuro di gallio. Le **celle di silicio amorfo** sono utilizzate in una vasta gamma di prodotti di consumo (per esempio le calcolatrici solari). Le celle all'arseniuro di gallio sono dotate di ottime caratteristiche di assorbimento della radiazione (indipendente dallo spessore della giunzione) e di elevata resistenza alle radiazioni, hanno un'efficienza poco condizionata dalla temperatura e un'ottima capacità di funzionare anche con flussi luminosi intensi. Il loro costo, allo stato attuale della tecnologia dell'arseniuro di gallio, è però ancora molto elevato, per cui possono essere vantaggiosamente utilizzate solo nelle applicazioni militari e aerospaziali.

Una innovazione recente, che si sta rivelando molto interessante dal punto di vista tecnologico, sono le **celle solari all'arseniuro di gallio multigiunzione**, ottenute ponendo in serie ottica un certo numero di giunzioni PN attive dal punto di vista dell'effetto fotovoltaico e con larghezze della banda interdetta crescenti, in modo che la radiazione non assorbita da una cella si trasmetta alla successiva; è così possibile sfruttare in modo ottimale l'energia distribuita sullo spettro solare, migliorando l'efficienza di conversione della cella. Con queste celle sono state raggiunte efficienze del 20-21%.

Le celle solari sono di norma collegate in serie, per fornire tensioni più elevate, e in parallelo per fornire correnti più intense (▸ ***Fig. 5.8***). Le celle solari vengono costruite utilizzando forme costruttive che le predispongono a questi tipi di montaggio (▸ ***Figg. 5.9a, b***). Tali insiemi di celle sono noti come **pannelli solari**.

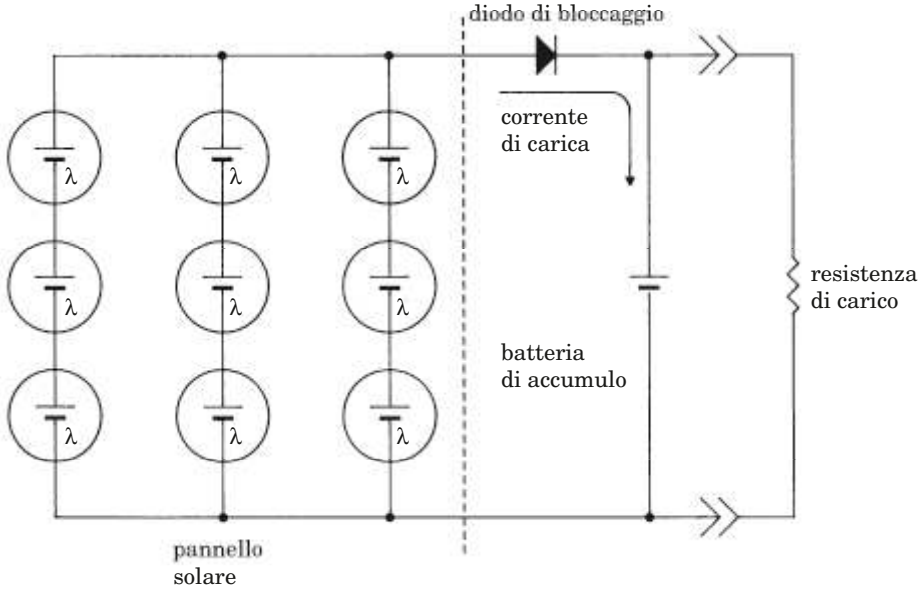
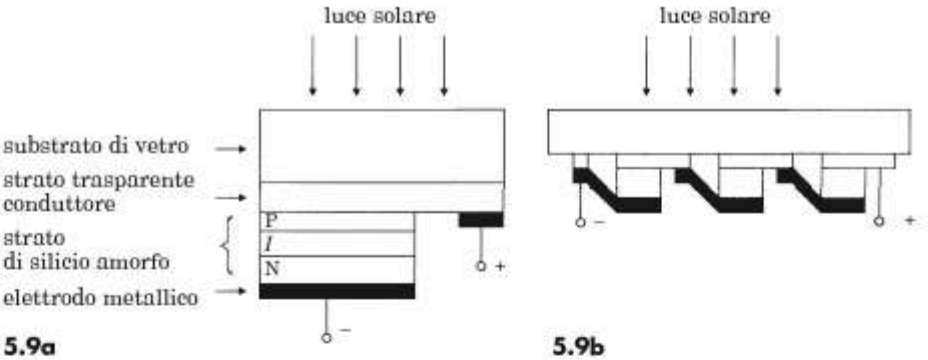


Fig. 5.8
Cablaggio serie-parallelo di più celle solari per elevare la tensione e la corrente generata (pannello solare).

Figg. 5.9a, b:

a. struttura di una cella fotovoltaica in silicio amorfo;

b. schema di connessione in serie.



5.9a **5.9b**

Le prestazioni di una cella solare sono descritte da apposite curve caratteristiche corrente-tensione (▸ ***Fig. 5.10***). La potenza di uscita di una cella solare diminuisce all'aumentare della temperatura (▸ ***Fig. 5.11***).

Fig. 5.10

Curve caratteristiche corrente-tensione di una cella solare per diverse temperature.

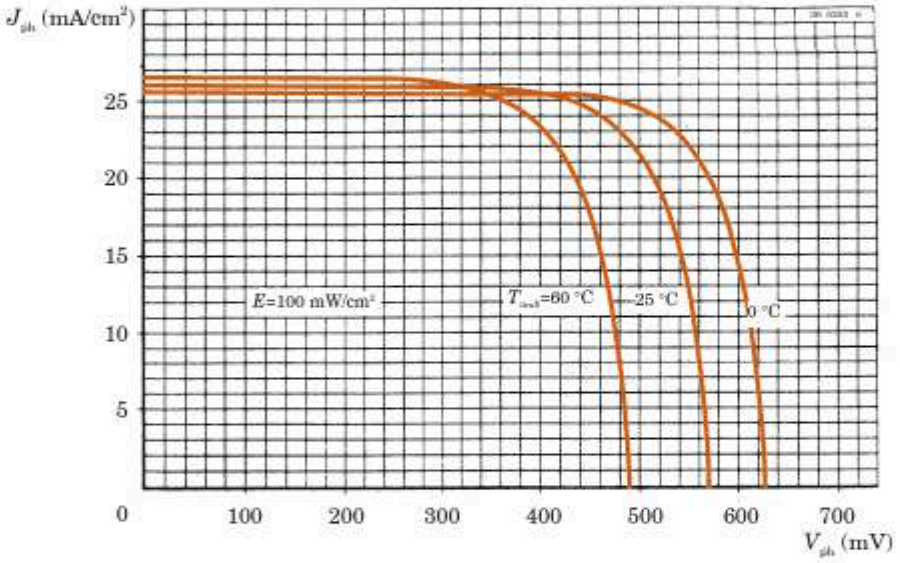


Fig. 5.11

Curve caratteristiche corrente-tensione di una cella solare per diverse intensità luminose.

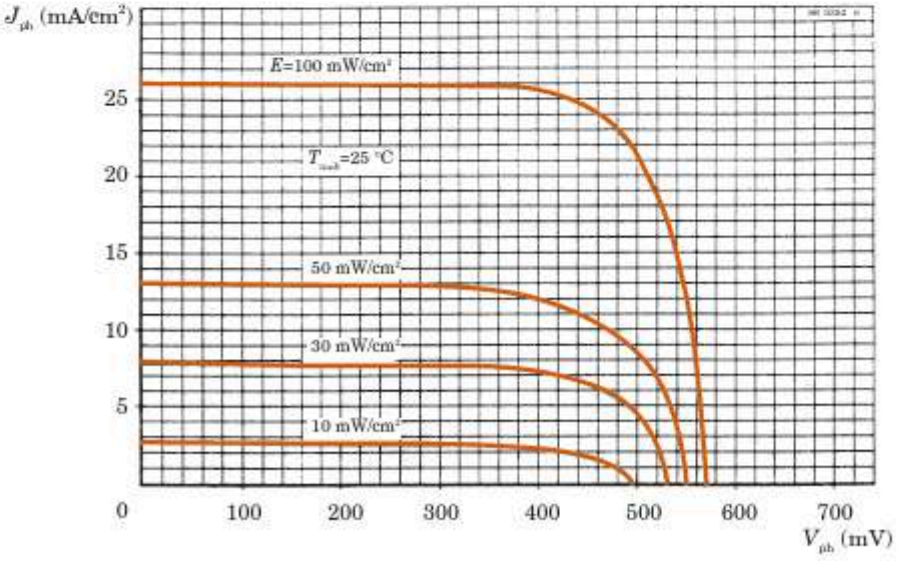


Fig. 5.12
Cella solare.

Le nuove celle realizzate con l'arseniuro di gallio degradano in maniera meno sensibile di quelle al silicio e forniscono, con un alto grado di affidabilità, efficienze elevate (circa il 25%) anche a temperature prossime ai 200 °C.

La ***figura 5.12*** mostra la forma costruttiva di una cella solare.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Quali sono i principali dispositivi fotorivelatori?
2. Quali sono le principali caratteristiche delle fotoresistenze?
3. Qual è il principio di funzionamento di un fotodiodo?
4. Che cos'è una cella solare?

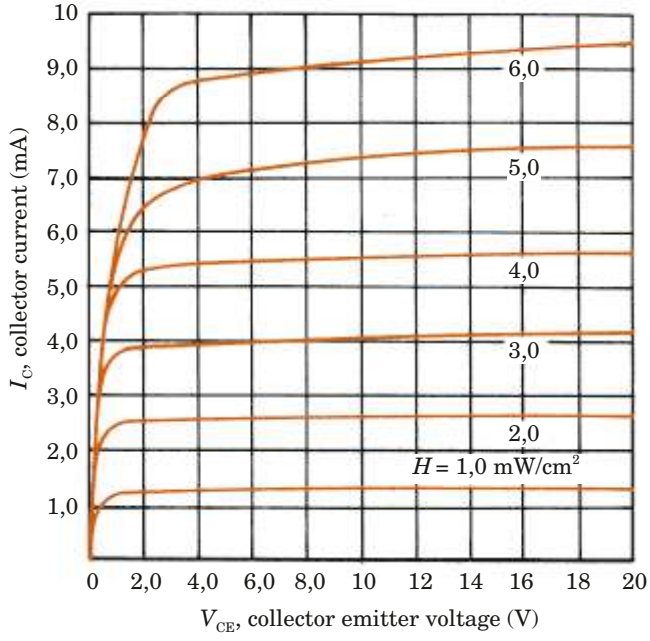
3 FOTOTRANSISTOR

I fototransistor sono transistor incapsulati in contenitori provvisti di una lente, in plastica o in vetro trasparente, che permette alla radiazione incidente di agire sulla giunzione collettore-base. La radiazione sostituisce o incrementa, in funzione del circuito realizzato, la corrente di base nel transistor. Il coefficiente di amplificazione di corrente di questi dispositivi è quindi funzione dell'intensità della radiazione incidente.

Caratteristiche elettriche

La curva caratteristica mostra la relazione corrente di collettore-tensione collettore emettitore in funzione della radiazione incidente misurata in W/cm^2 (◗ ***Fig. 5.13***).

Fig. 5.13
Caratteristica voltamperometrica di uscita del fototransistor MDR300 (*fonte*: Motorola).



I principali parametri dei fototransistor sono:

— la corrente di collettore massima;
— la tensione di collettore massima;
— la potenza massima dissipabile;
— il tempo di ritardo e il tempo di salita;
— la sensibilità, ossia il rapporto fra corrente generata e radiazione incidente (A/lx).

La ***tabella 5.2*** elenca i valori tipici di alcuni parametri caratteristici dei fototransistor.

Tabella 5.2 Parametri dei fototransistor (*fonte*: Motorola)

DEVICE	LIGHT CURRENT @V_R = 20 V H = 5 mW/cm² mA (Typ)	$V_{(BR)}$CEO V (min)	T_F/T_R @V_{CC} = 20 V I_L = 1000 μA μs (Typ)
MRD150	2,2	40	2,5/4
MRD310	3,5	50	2/2,5
MRD300	8	50	2/2,5
MRD3050	0,1 (min)	30	2/2,5
MRD3051	0,2 (min)	30	2/2,5
MRD3054	0,5 (min)	30	2/2,5
MRD3055	1,5 (min)	30	2/2,5
MRD3056	2 (min)	30	2/2,5
			T_{ON}/T_{OFF} @V_{CC} = 5 V
MRD701	0,5	30	10/60

Spesso la base del fototransistor è collegata con un terminale esterno del contenitore in modo che sia possibile, applicando una tensione di polarizzazione appropriata, modificare le caratteristiche del fototransistor e renderlo più o meno sensibile alla radiazione incidente.

Rappresentazione grafica

Simbolo grafico e lettera di identificazione

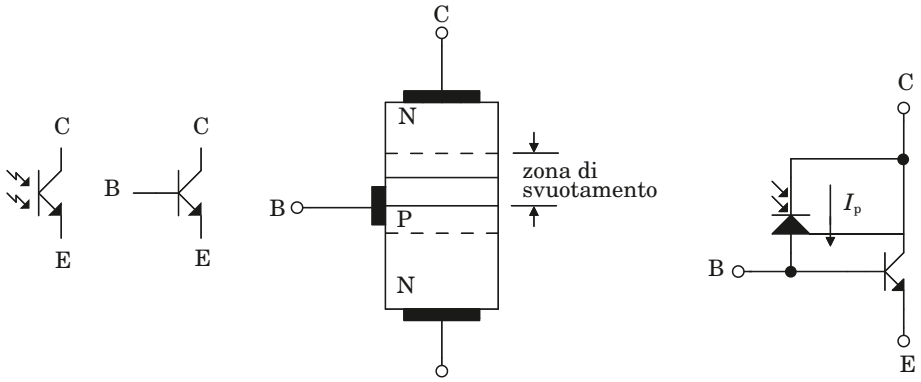
Il fototransistor viene disegnato come un transistor bipolare con l'aggiunta di due frecce, che rappresentano la radiazione incidente, rivolte verso la sua base (▸ ***Fig. 5.14a, b, c***).

La lettera di identificazione è la stessa usata per il transistor: Q.

Tipo di contenitore

Il fototransistor utilizza un contenitore metallico provvisto di lente trasparente che focalizza la radiazione incidente sulla giunzione collettore base del transistor. La ***figura 5.15*** presenta la forma del contenitore del fototransistor.

Figg. 5.14a, b, c
Fototransistor:
a. simbolo grafico;
b. struttura;
c. circuito equivalente.



5.14a **5.14b** **5.14c**

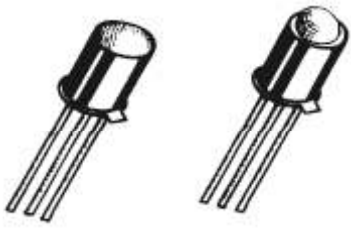


Fig. 5.15
Forma del contenitore del fototransistor.

Applicazioni

Il fototransistor viene impiegato, come il fotodiodo, per misurare l'intensità luminosa nelle apparecchiature di misura (fotometri) o come interruttore o generatore di segnali binari sfruttando le due condizioni di saturazione (radiazione presente) o di interdizione (radiazione assente).

Applicazioni tipiche sono lettori di nastri o codici a barre, sensori di posizione, encoder ottici (▸ ***Mod. A, Cap. 1***).

Fotodarlington

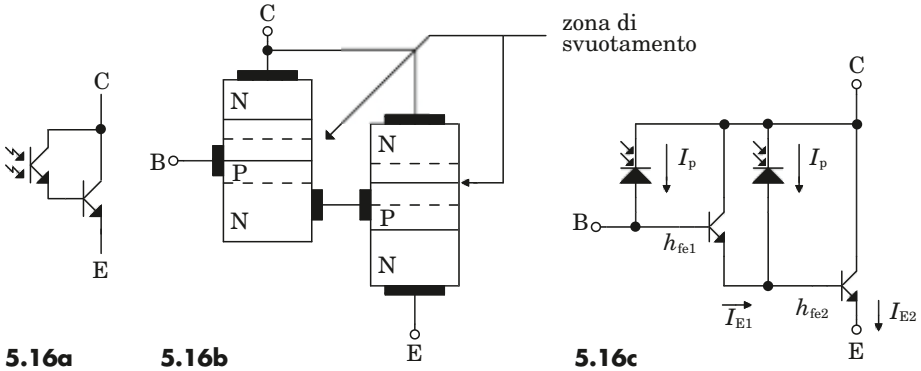
Questo componente permette di ottenere correnti di maggiore entità, ma è soprattutto caratterizzato da velocità di commutazione più elevate e da maggiore sensibilità all'azione della radiazione incidente.

La ***tabella 5.3*** elenca i valori tipici dei parametri che caratterizzano i fotodarlington. Le ***figure 5.16a, b, c*** ne mostrano il simbolo grafico, la struttura caratteristica e il circuito equivalente.

Tabella 5.3 Parametri dei fotodarlington (*fonte*: Motorola)

DEVICE	LIGHT CURRENT @V_R = 5 V H = 0,5 mW/cm² mA (Typ)	$V_{(BR)CEO}$ V (min)	T_f/T_R @V_{CC} = 5 V µs (Typ)
MRD370	10	40	2,5/4
MRD360	20	40	2/2,5
MRD711	25	60	2/2,5

Figg. 5.16a, b, c
Fotodarlington:
a. simbolo grafico;
b. struttura;
c. circuito equivalente.



5.16a **5.16b** **5.16c**

4 FOTOTIRISTORI

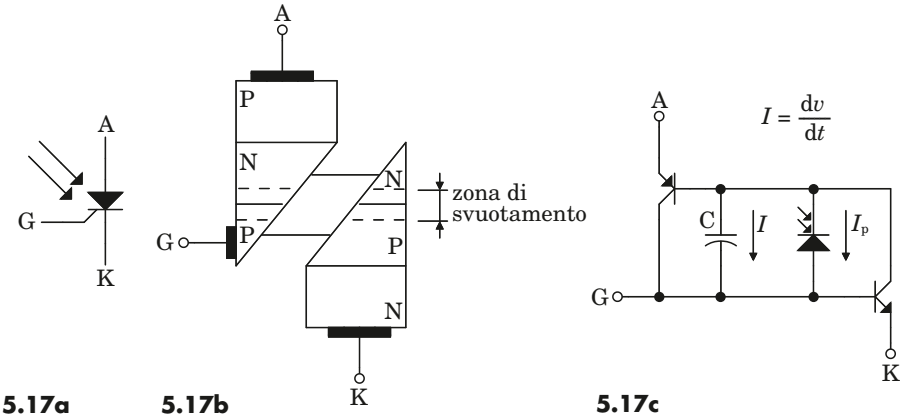
I fototiristori (fotoscr, fototriac) sono un altro importante tipo di fotoelemento. Hanno la giunzione fotosensibile incorporata in una struttura a tiristore.

LASCR
– Light activated SCR

Le ***figure 5.17a, b, c*** mostrano la struttura di un fotoscr, detto **LASCR**, il cui gate è sensibile a una specifica radiazione luminosa; perché possa condurre è infatti necessario sollecitarlo con una radiazione la cui intensità superi una soglia prefissata. In condizioni di buio il tiristore è spento.

I tiristori (▸ ***Mod. B, Cap. 3***) commutano correnti e tensioni elevate; è quindi necessario che gli elementi del circuito di innesco non siano connessi alla tensione di rete. L'isolamento dei due circuiti va realizzato con una conversione di energia, in modo che non vi sia trasporto di cariche tra di essi. Tale isolamento si può ottenere con un trasformatore di impulsi o con un accoppiatore ottico: il primo effettua l'accoppiamento fra i due circuiti sfruttando il fenomeno dell'induzione magnetica, il secondo utilizzando la luce.

Figg. 5.17a, b, c
Fotoscr (LASCR):
a. simbolo grafico;
b. struttura;
c. circuito equivalente.



5.17a **5.17b** **5.17c**

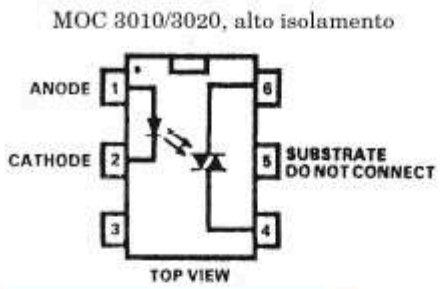
Tutti gli accoppiatori ottici descritti finora sono in grado di svolgere le due funzioni richieste: isolamento galvanico dei circuiti e trasmissione dell'informazione con conversione di energia elettrica-luminosa-elettrica; essi presentano però l'inconveniente di dover essere alimentati in tensione continua (fototransistor e fotodarlington) o di essere caratterizzati da bassi valori della tensione inversa (fotodiodi), per cui la tensione di alimentazione va ridotta e i dispositivi devono essere protetti.

Di conseguenza la configurazione dei circuiti di ingresso è abbastanza complessa, richiede molti elementi circuitali e in generale risulta meno affidabile.

I fotoaccoppiatori a fototiristore sono formati da un diodo emittente a infrarossi e da un tiristore (SCR o Triac) sensibile alla radiazione luminosa (▸ ***Fig. 5.18***). Il loro parametro più significativo è la tensione di isolamento V_{ISO} fra la parte emittente e quella ricevente, il cui valore tipico è di 7500 V.

In stato on, il fototriac può essere percorso da correnti di bassa intensità, e per questo motivo viene in genere utilizzato per pilotare il circuito di gate di Triac con prestazioni superiori. La ***tabella 5.4*** elenca i valori tipici dei parametri che caratterizzano un fototriac.

Fig. 5.18
Accoppiatore ottico con rilevatore a fototriac (*fonte*: Motorola).



Specifiche tecniche		
LED	*MOC 3010*	*MOC 3020*
I_F (max.)	50 mA	50 mA
V_R (max.)	3 V	3 V
V_F (max.)	1,5 V	1,5 V
Triac		
V_{DRM}	250 V	400 V
I_T	–	100 mA
V_{TM} (max.)	3 V	3 V
Caratteristiche del fotoaccoppiatore		
Corrente di entrata per attivare il tiristore bidirezionale	15 mA	30 mA
Tensione d'isolamento	7500 V (picco)	7500 V (picco)
Campo di temperatura	da -40°C a + 100°C	da -40°C a + 100°C

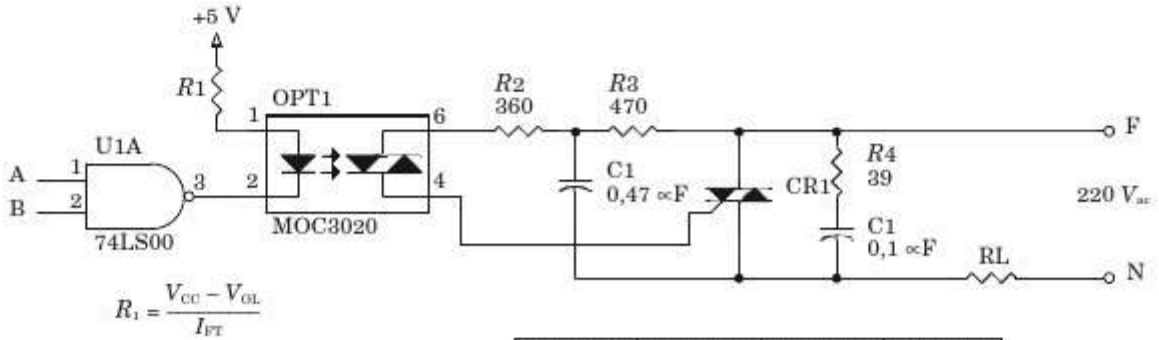
Tabella 5.4 Parametri dei fototriac (*fonte*: Motorola)

DEVICE	H_{FT} mW/cm² (max)	$I_{T(RMS)}$ mA (max)	V_{DRM} V_{PEAK} (min)	I_{DRM} nA (Typ)
MRD3010	5	100	250	10
MRD3011	2	100	250	10

SSR
– Solid State Relay

La ***figura 5.19*** mostra un'applicazione molto interessante: un circuito che funziona come un relè. Il diodo del fototriac emette la radiazione luminosa quando l'uscita della porta logica è al livello basso (a massa) e si spegne quando la stessa è al livello logico alto (tensione positiva); la radiazione innesca il fototriac, e questo genera la corrente di innesco per il Triac di potenza che a sua volta permette l'alimentazione del carico. I circuiti di questo tipo sono denominati **relè allo stato solido** (SSR); molti costruttori li producono avvalendosi della tecnologia dei circuiti ibridi, per le versioni di potenza elevate, e della tecnologia monolitica per quelle di bassa potenza. Tali circuiti sono incapsulati in contenitori a forma di parallelepipedo (moduli) che vengono poi utilizzati come dei veri e propri componenti elettronici.

Fig. 5.19
Relè allo stato solido.



$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_{OL}}{I_{FT}}$$

			MOC3020	MOC3021	MOC3022	MOC3023
I_{FT}	Trigger current	mA	30	15	10	5

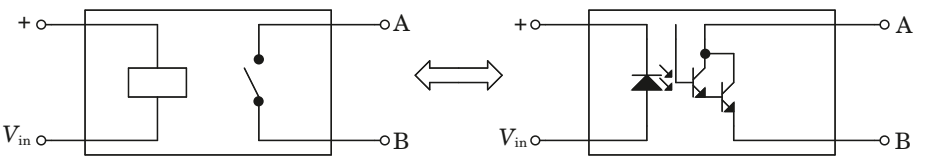
5 FOTOACCOPPIATORI

I fotoaccoppiatori sono realizzati unendo in uno stesso contenitore un diodo led o IRED e un fotodiodo o fototransistor, entrambi con la stessa risposta spettrale. Quando il diodo led viene polarizzato direttamente, la radiazione emessa viene raccolta dal fotorivelatore, che a sua volta può entrare in conduzione.

La ***figura 5.20*** mostra l'equivalenza circuitale fra un relè a un contatto e un fotoaccoppiatore. Questo dispositivo realizza un isolamento elettrico fra il segnale di ingresso e il segnale di uscita. La continuità del collegamento elettrico fra due configurazioni circuitali viene quindi mantenuta grazie all'energia trasferita dalla radiazione emessa dal diodo led e captata dall'elemento fotorivelatore.

La trasmissione della luce può avvenire mediante vari materiali: l'aria, un materiale trasparente, la fibra ottica.

Fig. 5.20
Equivalenza funzionale tra un relè a un contatto e un fotoaccoppiatore.



Caratteristiche elettriche

Le caratteristiche spettrali di emissione dell'elemento fotoemittente e quelle dell'elemento fotoricevente devono essere uguali, in modo da ottenere per entrambi la massima efficienza e sensibilità alla stessa lunghezza d'onda.

CTR
– Current trasnfer ratio

Il parametro che caratterizza questo componente è il **rapporto di trasferimento di corrente** (CTR), ossia il rapporto, espresso in percentuale, fra la corrente fornita dal fotorivelatore e la corrente diretta assorbita dal diodo fotoemittente; se l'elemento fotorivelatore è un fotodarlington si possono ottenere alti valori di CTR. Il CTR dipende dall'efficienza radiante del diodo emettitore, dalla posizione relativa dei due elementi, emettitore e rivelatore, e dall'efficienza del rivelatore.

La principale funzione circuitale di un optoisolatore è quella di disaccoppiare un segnale in ingresso rispetto all'apparecchiatura che deve elaborarlo o viceversa. Il parametro che permette di valutare la capacità di isolamento dell'optoisolatore è la **tensione di isolamento** (di norma $> 7500\ V_{ac\ peak}$).

Quando lo si inserisce in circuiti di tipo digitale bisogna valutare attentamente il suo tempo di commutazione perché l'optoisolatore dev'essere in grado di commutare alla massima frequenza presente nel segnale di ingresso. In alcuni optoisolatori, che utilizzano come fotorivelatore un fototransistor, è reso accessibile anche il morsetto di base. Quest'ultimo, opportunamente polarizzato, può incrementare il CTR del dispositivo.

Altre realizzazioni possono contenere, oltre all'elemento fotorivelatore, un vero e proprio circuito che elabora il segnale: porte NAND, trigger di Schmitt, Triac attivati dalla radiazione luminosa (▸ ***Fig. 5.21***).

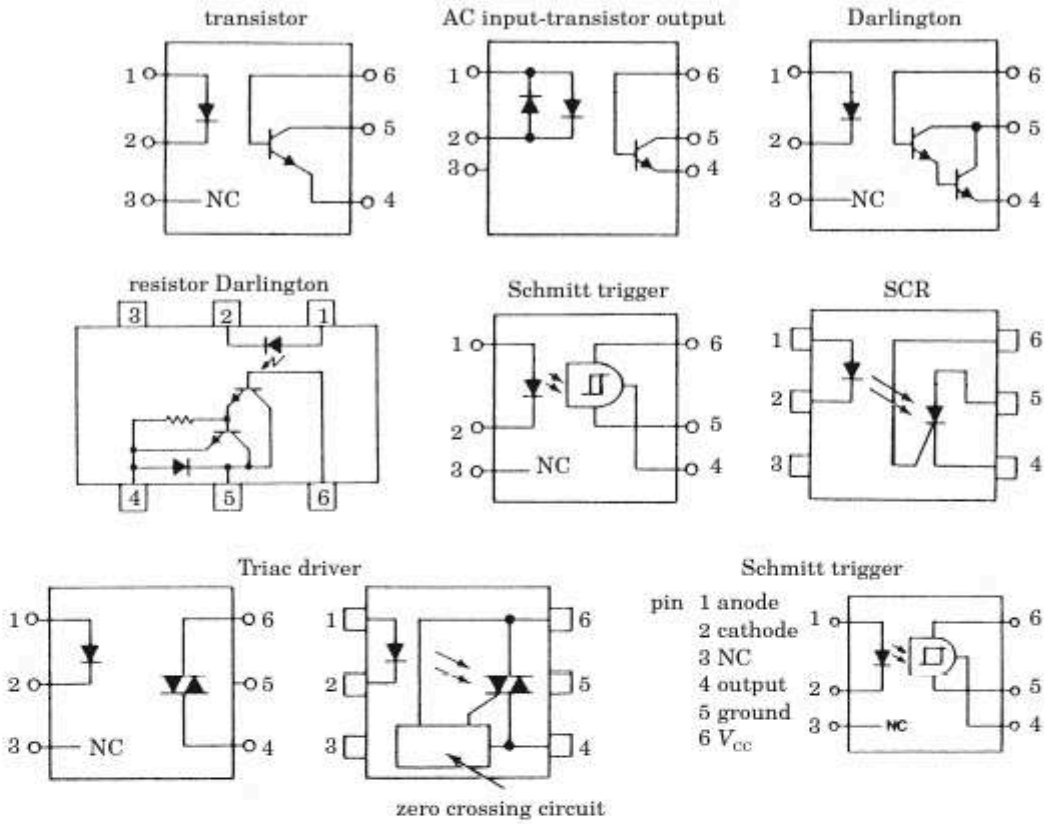


Fig. 5.21
Tipi di fotoaccoppiatore.

I vantaggi offerti dal fotoaccoppiatore sono:
— elevato valore della tensione e della resistenza di isolamento;
— basso valore della capacità di isolamento;
— assenza di organi meccanici in movimento e quindi assenza di rimbalzi;
— buona velocità di commutazione (dell'ordine dei MHz);
— assenza di emissioni d'interferenza elettromagnetica (EMI);
— ingombro ridotto;
— facilità di montaggio su circuito stampato;
— funzionamento a bassa potenza;
— temperatura di funzionamento elevata (fino a 100 °C);
— costo basso.

EMI
– Electromagnetic interference

I difetti del fotoaccoppiatore sono:
— resistenza di apertura non infinita;
— corrente nello stato di conduzione limitata;
— bassa potenza commutabile;
— limitata tensione inversa.

La ***figura 5.22*** elenca i valori tipici dei parametri che caratterizzano gli optoisolatori.

Fig. 5.22 Parametri dei fotoaccoppiatori veloci (*fonte*: Motorola).

Transistor Output with No Base Connection

Pinout: 1-Anode, 2-Cathode, 3-N.C., 4-Emitter, 5-Collector, 6-N.C.

Device	Current Transfer Ratio (CTR) % Min	@ I_F mA	V_{CE} Volts	$V_{CE(sat)}$ Volts Max	@ I_F mA	I_C mA	t_r/t_f or t_{on}*/t_{off}* Typ µs	@ I_C mA	V_{CC} Volts	R_L Ω	I_F mA	$V_{(BR)CEO}$ Volts Min	V_F Volts Max	@ I_F mA
MOC8111	20	10	10	0,4	10	0,5	3,2/4,7	2	10	100		30	1,5	10
MOC8112	50	10	10	0,4	10	0,5	3,2/4,7	2	10	100		30	1,5	10
MOC8113	100	10	10	0,4	10	0,5	3,2/4,7	2	10	100		30	1,5	10

AC Input — Transistor Output

Pinout: 1-LED 1 Anode/LED 2 Cathode, 2-LED 1 Cathode/LED 2 Anode, 3-N.C., 4-Emitter, 5-Collector, 6-Base

H11AA1	20	±10	10	0,4	±10	0,5						30	1,5	±10
H11AA2	10	±10	10	0,4	±10	0,5						30	1,8	±10
H11AA3	50	±10	10	0,4	±10	0,5						30	1,5	±10
H11AA4	100	±10	10	0,4	±10	0,5						30	1,5	±10

Darlington Output

Pinout: 1-Anode, 2-Cathode, 3-N.C., 4-Emitter, 5-Collector, 6-Base

4N31	50	10	10	1,2	8	2	0,6*/17*	50	10		200	30	1,5	10
4N29,A	100	10	10	1	8	2	0,6*/17*	50	10		200	30	1,5	10
4N30	100	10	10	1	8	2	0,6*/17*	50	10		200	30	1,5	10
H11B255	100	10	5	1	50	50	125*/100*	10	10	100		55	1,5	20
MCA230	100	10	5	1	50	50	10/35		10	100	50	30	1,5	20
MCA255	100	10	5	1	50	50	10/35		10	100	50	55	1,5	20
H11B2	200	1	5	1	1	1	1/2	10	10	100		25	1,5	10
MCA231	200	1	1	1,2	10	50	80	10	10	100		30	1,5	20
TIL113	300	10	1,25	1	50	125	300	125	15	100		30	1,5	10
4N32,A	500	10	10	1	8	2	0,6*/45*	50	10		200	30	1,5	10
4N33	500	10	10	1	8	2	0,6*/45*	50	10		200	30	1,5	10
H11B1	500	1	5	1	1	1	1/2	10	10	100		25	1,5	10
MOC8080	500	10	5	1	1	1	1/2		10	100	5	55	1,5	10

Darlington Output with No Base Connection

Pinout: 1-Anode, 2-Cathode, 3-N.C., 4-Emitter, 5-Collector, 6-N.C.

MOC119	300	10	2	1	10	10	1/2	2,5	10	100		30	1,5	10
TIL119	300	10	2	1	10	10	300	2,5	10	100		30	1,5	10
MOC8030	300	10	1,5				1/2		50	100	10	80	2	10
MOC8020	500	10	5				1/2		50	100	10	50	2	10
MOC8050	500	10	1,5				1/2		50	100	10	80	2	10
MOC8021	1000	10	5				1/2		50	100	10	50	2	10

Resistor-Darlington Output

Pinout: 1-Anode, 2-Cathode, 3-N.C., 4-Emitter, 5-Collector, 6-Base

H11G1	1000	10	1	1	1	1	5*/100*		5	100	10	100	1,5	10
H11G2	1000	10	1	1	1	1	5*/100*		5	100	10	80	1,5	10
H11G3	200	1	5	1,2	50	20	5*/100*		5	100	10	55	1,5	10

High Voltage Transistor Output

Pinout: 1-Anode, 2-Cathode, 3-N.C., 4-Emitter, 5-Collector, 6-Base

MOC8204	20	10	10	0,4	10	0,5	5*/5*	2	10	100		400	1,5	10
H11D1	20	10	10	0,4	10	0,5	5*/5*	2	10	100		300	1,5	10
H11D2	20	10	10	0,4	10	0,5	5*/5*	2	10	100		300	1,5	10
H11D3	20	10	10	0,4	10	0,5	5*/5*	2	10	100		200	1,5	10
H11D4	10	10	10	0,4	10	0,5	5*/5*	2	10	100		200	1,5	10
4N38	10	10	10	1	20	4	1,6/2,2	10	10			80	1,5	10
4N38A	10	10	10	1	20	4	1,6/2,2	10	10			80	1,5	10
MCT275	70–210	10	10	0,4	16	2	4,5*/3,5*	2	5	100		80	1,5	20

(R) = RMS (D) = DC *t_{on}, t_{off}

Triac Driver Output

Pinout: 1-Anode, 2-Cathode, 3-N.C., 4-Main Terminal, 5-Substrate, 6-Main Terminal

Device	Peak Blocking Voltage Min	LED Trigger Current-I_{FT} (V_{TM} = 3 V) mA Max	Zero Crossing Inhibit Voltage (at rated I_{FT}) Volts Max	V_{ISO} Vac Pk	dv/dt V/μs Typ
MOC3009	250	30	—	7500	10
MOC3010	250	15	—	7500	10
MOC3011	250	10	—	7500	10
MOC3012	250	5	—	7500	10
MOC3020	400	30	—	7500	10
MOC3021	400	15	—	7500	10
MOC3022	400	10	—	7500	10
MOC3023	400	5	—	7500	10
MOC3031	250	15	20	7500	2000
MOC3032	250	10	20	7500	2000
MOC3033	250	5	20	7500	2000
MOC3041	400	15	20	7500	2000
MOC3042	400	10	20	7500	2000
MOC3043	400	5	20	7500	2000
MOC3061	600	15	20	7500	1500
MOC3062	600	10	20	7500	1500
MOC3063	600	5	20	7500	1500
MOC3081	800	15	20	7500	1500
MOC3082	800	10	20	7500	1500
MOC3083	800	5	20	7500	1500

SCR Output

Device	Peak Blocking Voltage Min	LED Trigger Current-I_{FT} (V_{AK} = 50 V) mA Max	V_{ISO} Vac Pk	dv/dt V/μs Typ
4N39	200	30	1500	500
4N40	400	30	1500	500
H11C1	200	20	3535	500 Min
H11C2	200	20	2500	500 Min
H11C3	200	30	2500	500 Min
MCS2400	400	14(V_{AK} = 100 V)	3000 RMS	
MOC3000	400	20	7500	500
MOC3001	400	30	7500	500
MOC3002	250	30	7500	500
MOC3003	250	20	7500	500
MOC3007	200	40	7500	500
H11C4	400	20	3535	500
H11C5	400	20	2500	500
H11C6	400	30	2500	500

Schmitt Trigger Output

Device	Threshold Current On mA Max	Threshold Current Off mA Min	$I_{F(off)}/I_{F(on)}$ Min	$I_{F(off)}/I_{F(on)}$ Max	V_{CC} Min	V_{CC} Max	t_r, t_f μs Typ	V_{ISO} Vac Pk
H11L1	1,6	0,3	0,5	0,9	3	15	0,1	3535
H11L2	10	0,3	0,5	0,9	3	15	0,1	3535
MOC5007	1,6	0,3	0,5	0,9	3	15	0,1	
MOC5008	4	0,3	0,5	0,9	3	15	0,1	
MOC5009	10	0,3	0,5	0,9	3	15	0,1	

Rappresentazione grafica

Simbolo grafico e lettera di identificazione

Non esiste un vero e proprio simbolo grafico da utilizzare per disegnare un fotoaccoppiatore. Il modo più diffuso è quello di racchiudere in un rettangolo, tracciato con una linea tratteggiata o continua, sia il simbolo del diodo emittitore sia quello del fotorivelatore (▸ ***Fig. 5.23***). È buona norma indicare tutti i morsetti, anche quelli non utilizzati; il numero di identificazione del morsetto viene indicato sopra la linea di collegamento e comunque sempre al di fuori del simbolo.

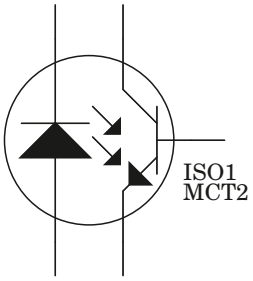
L'optoisolatore non è un componente elettronico, ma piuttosto un assemblaggio di dispositivi. Non esiste una lettera di identificazione normalizzata e nella letteratura viene utilizzata in genere la sigla OPT.

Sigla commerciale e tipo di contenitore

La sigla dev'essere conforme a quella che abbiamo esaminato nel ***Volume 2, Mod. B, Cap. 2***, ma qualche fabbricante non vi si attiene; in questi casi il tecnico si deve orientare consultando i fogli tecnici e di comparazione (*cross reference*) forniti dalle aziende produttrici.

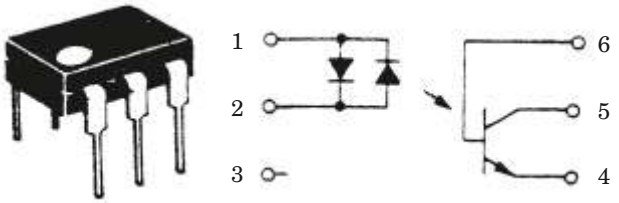
Il contenitore più diffuso degli optoisolatori (▸ ***Fig. 5.24***) utilizzati come separatori galvanici è il DIL plastico a 6 o 8 pin.

Per gli optoisolatori usati come fotorilevatori si adotta un contenitore a forma di *U* che contiene nei due bracci rispettivamente il diodo emettitore e il fototransistor. Fra i due bracci del dispositivo è possibile inserire un corpo opaco (▸ ***Fig. 5.25***).



5.23

Fig. 5.23
Simbolo grafico del fotoaccoppiatore.



5.24

Fig. 5.24
Fotoaccoppiatore racchiuso in un contenitore DIL.

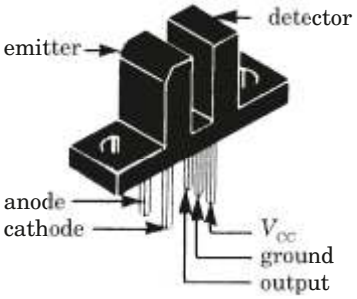


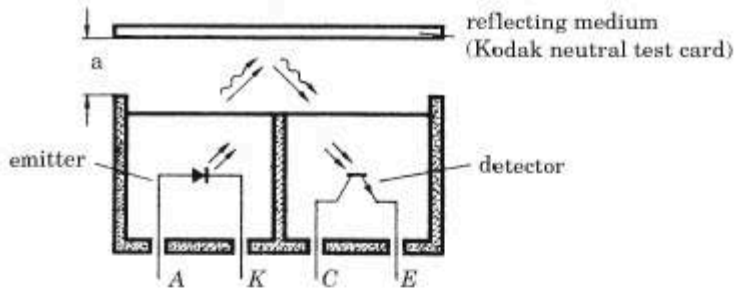
Fig. 5.25
Fotoaccoppiatore a interruzione (forcella ottica).

Valutando lo stato di conduzione o di non conduzione del fototransistor, si può quindi ottenere un circuito di scatto (blocco di un'apparecchiatura meccanica in movimento) o contare il numero di volte che il fenomeno si verifica (encoder ottici per la misura della velocità di rotazione di un motore).

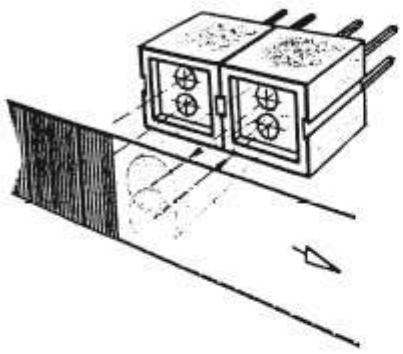
Esistono anche fotorivelatori a riflessione nei quali il diodo emettitore e il fotorivelatore non sono in asse. La radiazione emessa dal diodo raggiunge il fotorivelatore per riflessione quando quest'ultima incide sulla superficie (non opaca) dell'oggetto da rivelare (▸ ***Figg. 5.26a, b***).

I fotoaccoppiatori a interruzione richiedono che il mezzo da rilevare abbia una forma circolare e uno spessore opportuno, mentre quelli a riflessione non presentano limitazioni se non in relazione alle caratteristiche della superficie dell'oggetto da rilevare, che dev'essere in grado di riflettere i raggi infrarossi emessi dall'IRED del fotoaccoppiatore.

Figg. 5.26a, b
Fotoaccoppiatore a riflessione:
a. struttura interna;
b. utilizzo di un fotoaccoppiatore a riflessione.



5.26a



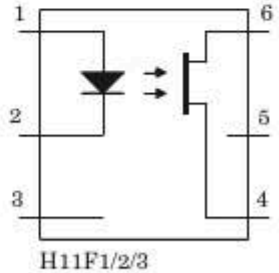
5.26b

Fotoaccoppiatori speciali

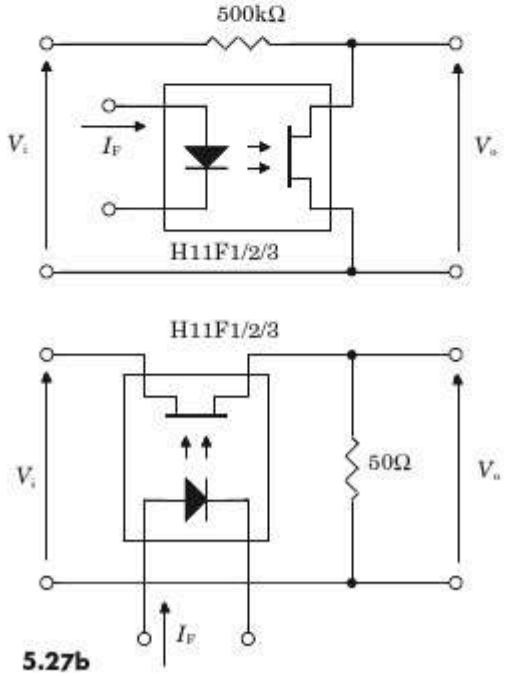
I fotoaccoppiatori sono componenti in continua evoluzione che diventano sempre più sofisticati integrando nel ricevitore, oltre al fotorivelatore, componenti e circuiti sempre più complessi.

Le ***figure 5.27a, b*** mostrano un fotoaccoppiatore che utilizza un fotorivelatore bilaterale simmetrico che si comporta come un JFET ideale isolato, capace di controllare segnali digitali e analogici di basso livello senza introdurre distorsioni. Il valore resistivo, misurato con una capacità in

Figg. 5.27a, b:
a. fotoaccoppiatore H11F1/2/3 che contiene un fotorivelatore;.
b. esempio di impiego: attenuatori (*fonte*: General Electric).



5.27a



5.27b

parallelo di 15 pF, varia da 100 Ω (**radiazione incidente massima**) a 300 MΩ (**buio**). Usato come interruttore analogico, è in grado di sopportare tensioni di 60 V_{pp} manifestando una bassissima tensione di offset. Con questo dispositivo si possono realizzare attenuatori variabili isolati, attenuatori automatici di guadagno, commutatori analogici del condensatore di un circuito di campionamento e tenuta (*sample-and-hold*) isolati dal convertitore analogico/digitale.

Un altro fotoaccoppiatore interessante è della ***figura 5.28***; il fotorivelatore è inserito in un circuito che realizza un trigger di Schmitt con isteresi che consente di ottenere in uscita un segnale perfettamente squadrato (tempo di salita e di discesa di ≅15 µs) ed esente da disturbi. Lo stadio di uscita è a collettore aperto e può essere interfacciato con semplicità con tutte le famiglie logiche.

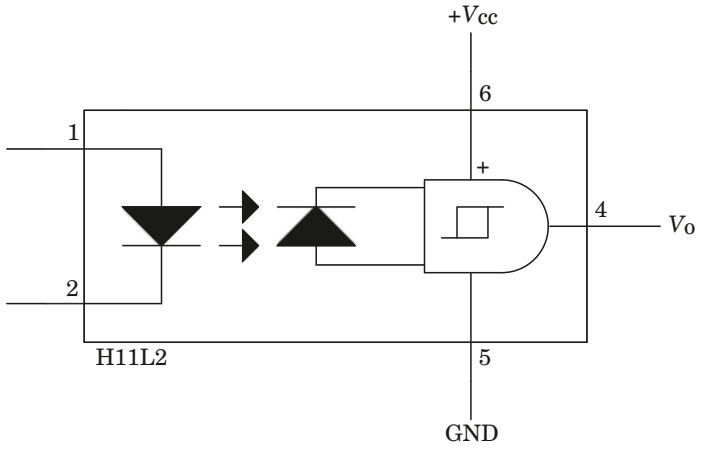


Fig. 5.28
Fotoaccoppiatore H11L1/2 contenente un rilevatore a velocità elevata inserito in un circuito a trigger di Schmitt con isteresi (*fonte*: General Electric).

Il fotoaccoppiatore della ***figura 5.29*** segnala la presenza/assenza della tensione di rete. Il circuito di ingresso è formato da due diodi led connessi in antiparallelo, e pertanto in grado di rispondere sia alla semionda positiva sia a quella negativa. Essi forniscono impulsi di corrente a una frequenza di 100 Hz. Se la corrente di ingresso dei fotoemettitori è superiore a 4 mA (efficaci), i diodi sono saturi e in uscita si rileva un livello logico, TTL compatibile, basso; se invece la corrente di ingresso scende sotto i 4 mA (efficaci), in uscita si rileva un'onda quadra che oscilla a 100 Hz.

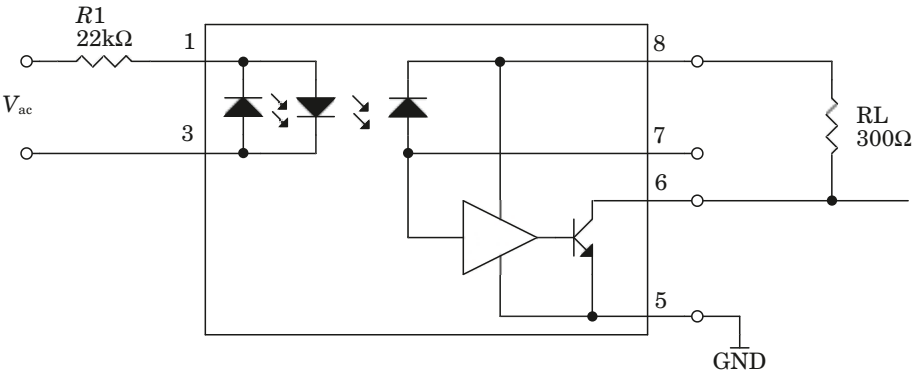


Fig. 5.29
Schema elettrico del fotoaccoppiatore MID 400 della General Electric in grado di segnalare la presenza o l'assenza della tensione di rete.

Applicazioni

Le principali applicazioni dei fotoaccoppiatori sono:

— la separazione e l'isolamento dei segnali scambiati fra due apparecchiature elettroniche e nei relè allo stato solido;
— come sensori di posizione negli encoder ottici;
— l'interfacciamento fra due livelli di tensione differenti, per consentire il dialogo tra circuiti logici realizzati con famiglie logiche diverse;
— l'isolamento dalle sorgenti di rumore e l'eliminazione delle maglie di terra (*ground loop*) nei sistemi di alimentazione.

I **fotoaccoppiatori a interruzione** e **a riflessione** vengono utilizzati per rilevare:

— il movimento angolare: sensori di movimento (fine di un nastro), riconoscimento della direzione del moto;
— il movimento rotatorio: misura del numero di giri (motori, ingranaggi), riconoscimento della direzione di rotazione, controllo del movimento (spegnimento a fine nastro), sensori di inceppamento (macchine utensili), scansione di codici a barre;
— il cambiamento di posizione: rivelatori di prossimità, rilevazione e misura della distanza, riconoscimento della posizione, conteggio di pezzi su nastri trasportatori;
— la variazione di riflettività: controllo di nastri magnetici (inizio/fine nastro, ricerca di sezioni di nastro), scansione codici a barre a bassa risoluzione, scansione di fori e fessure rappresentanti codici, riconoscimento della variazione dei colori nei processi chimici, determinazione della densità di materiali e liquidi;
— la variazione di quantità: indicazione del livello di materiali solidi (carta nelle copiatrici, detersivo nelle lavatrici) e liquidi (distributori automatici di bevande, lavatrici, lavastoviglie).

PER FISSARE I CONCETTI

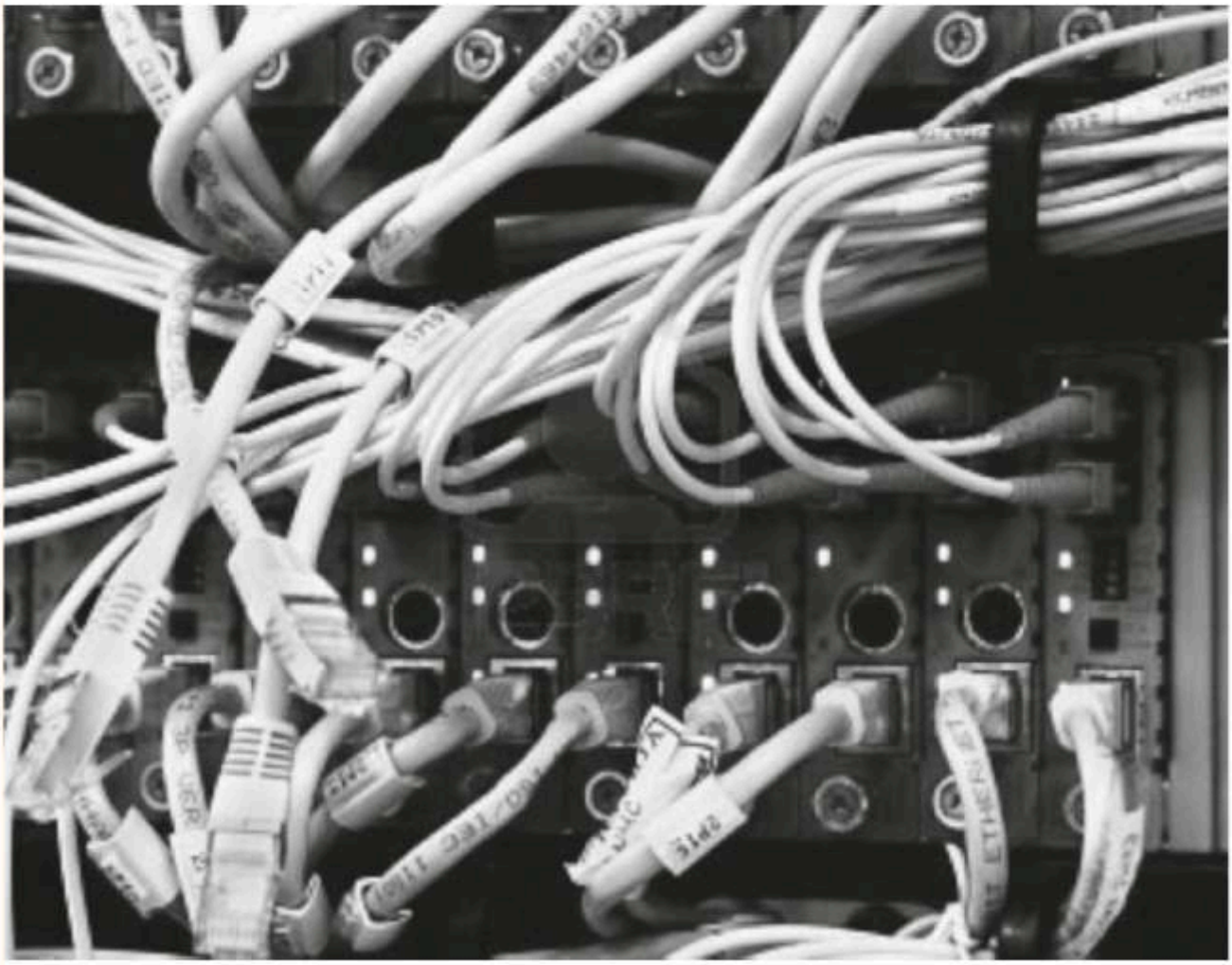
1. Che cos'è un fotoaccoppiatore? A che cosa serve?
2. Quando è conveniente impiegare un optoisolatore in un circuito?
3. Che cos'è il rapporto di trasferimento di corrente (CTR) di un optoisolatore?
4. Che cos'è un fototiristore?
5. Quali sono le principali applicazioni dei fotoaccoppiatori?

CAP 6 SISTEMI PER LA TRASMISSIONE DEI SEGNALI

1 Linea di trasmissione
2 Cavi ottici
3 Sistemi di comunicazione a fibra ottica
4 Sorgenti luminose per sistemi di comunicazione a fibra ottica
5 Rivelatori per sistemi a comunicazione a fibra ottica

Concetti chiave

- Fibra ottica
- Angolo di accettazione
- Impedenza caratteristica
- Dispersione modale
- Apertura numerica
- Dispersione cromatica
- Rumore di luminosità



SINTESI DEL MODULO C

CAPITOLO 4

Un dispositivo optoelettronico è un **emettitore** quando è in grado di convertire energia elettrica in una radiazione luminosa. Sono **dispositivi emettitori**: i diodi led, i diodi laser, i dispositivi a cristalli liquidi.

— I **diodi led** emettono radiazioni che si collocano nello spettro visibile (VLED) e nella banda dell'infrarosso (IRED).

— La generazione di una coppia elettrone-lacuna in un materiale semiconduttore può avvenire per effetto dell'energia fornita da una radiazione luminosa di opportuna lunghezza d'onda (visibile o infrarosso) che permette all'elettrone presente nella banda di valenza di saltare nella banda di conduzione. Nel processo di ricombinazione di un elettrone e di una lacuna, l'elettrone passa dalla banda di conduzione alla banda di valenza emettendo energia sotto forma di calore (**fononi**), che viene assorbito e disperso dal cristallo, oppure sotto forma di una radiazione luminosa (**fotoni**).

— La massima luminosità di un led si ha con un'alimentazione in corrente continua. L'**emissione luminosa** si riduce con l'aumento della temperatura, ma è un effetto reversibile e non influisce sulla vita media del dispositivo. Il diodo led è principalmente usato come **segnalatore di stato** nelle apparecchiature elettroniche, nei trasporti e nell'illuminotecnica.

Il **display** è un particolare assemblaggio di diodi led con cui si possono riprodurre in forma stilizzata le nove cifre del sistema numerico decimale. Ogni cifra viene composta mettendo in conduzione le coppie di diodi contenute in ciascuno dei sette segmenti.

— Il **display a cristalli liquidi** (LCD) per generare i caratteri non emette luce propria ma sfrutta quella dell'ambiente modificandola. I cristalli liquidi sono materiali che si trovano nella **mesofase**: le loro molecole hanno grande libertà di movimento, come avviene nei liquidi, mentre in altre circostanze possono disporsi con un certo ordine come nei materiali solidi cristallini.

— Il **cristallo liquido** è posto fra due sottili piastrine di vetro; sulla superficie interna delle piastrine vengono depositati per evaporazione, due strati di zinco e di indio che formeranno gli elettrodi del dispositivo. Gli strati sono così sottili da essere trasparenti. La loro faccia interna è trattata in modo da far variare l'orientamento delle molecole che si trovano nelle sue immediate vicinanze. L'applicazione ai due elettrodi di una tensione continua, e quindi di un campo elettrico esterno, produrrà una modificazione dell'orientamento delle molecole del cristallo liquido.

— I **visualizzatori LCD** sono costruiti con due tecnologie. Quella a scattering dinamico e quella ad effetto di campo; altre tecnologie utilizzate sono quelle a scarica, a fluorescenza e a plasma.

Nei **visualizzatori a scarica nei gas**, o **a fluorescenza**, la generazione dei caratteri è ottenuta sfruttando la ionizzazione di un gas (neon) o il fenomeno della fluorescenza provocato dall'urto degli elettroni contro una superficie opportunamente trattata.

— I **display fluorescenti sottovuoto** (VFD) sfruttano l'elettroluminescenza, fenomeno che si produce per effetto della transizione degli elettroni fra stati quantici caratterizzati da differenti livelli di energia: essa è infatti associata al decadimento di un elettrone dal livello quantico eccitato, ad alta energia, a un livello a più bassa energia. L'eccitazione dell'elettrone è ottenuta applicando un campo elettrico di intensità appropriata. I materiali luminescenti sono formati da cristalli di solfuro di zinco, un materiale semiconduttore, drogato con sali di rame o di manganese. I display luminescenti possono fornire immagini chiare, brillanti e dotate di un'eccellente visibilità, di un'elevata velocità di commutazione acceso-spento, di un ampio angolo di lettura e di un elevato contrasto.

— Il **display al plasma** (PDP) produce l'emissione luminosa grazie a un neon gassoso allo stato molecolare: un certo numero di elettrodi è disposto orizzontalmente e verticalmente sullo schermo in modo da formare una griglia; i punti di incrocio sono accessibili selezionando in modo opportuno gli elettrodi orizzontali e verticali. Possono funzionare in corrente continua e in corrente alternata.

Il **diodo laser** è un dispositivo che produce, e per stimolazione emette, una radiazione luminosa coerente a una lunghezza d'onda compresa fra 100 nm e 1,6 μm. Una radiazione luminosa è detta **coerente** quando è costituita da **fotoni** (quanti elementari di luce) emessi da una sorgente a intervalli di tempo regolari lungo la medesima direzione senza sfasamento relativo, e che giacciono sullo stesso piano di polarizzazione.

— Affinché un corpo possa emettere radiazioni è necessario che esistano elettroni risiedenti in orbitali ad alta energia che decadano, emettendo fotoni, in orbitali a minore energia. Per ottenere elettroni in numero eccedente a quello teorico di un orbitale occorre spostarli dagli orbitali più interni verso quelli esterni fornendo loro, attraverso una radiazione esterna, un'energia sufficiente a provocarne la migrazione. Quando nel materiale si verifica questa situazione si è in presenza di un'**emissione stimolata**, ove vi è un processo netto di amplificazione della luce.

— I laser sono caratterizzati dai seguenti parametri: **lunghezza d'onda** della radiazione emessa in nm; **potenza di picco** in W; **corrente di pompaggio** o alimentazione in A, **duty-cycle** di lavoro in %.

CAPITOLO 5

Un dispositivo optoelettronico è un **rivelatore** quando l'onda elettromagnetica stimola modifiche nel comportamento elettrico del dispositivo. Il rivelatore funziona in base al principio per cui una radiazione incidente, compresa in un certo campo di frequenze (infrarosso, visibile, ultravioletto), produce su una giunzione polarizzata inver-

strato di svuotamento della giunzione separa gli elettroni dalle lacune dando origine a una corrente di corto circuito o a una tensione a circuito aperto (a vuoto), detto **effetto fotovoltaico**.

— La tensione che appare ai capi di un fotodiodo a circuito aperto, a una data intensità della radiazione luminosa, viene definita **forza elettromotrice fotovoltaica**. I valori tipici della tensione fotovoltaica dei fotodiodi al silicio sono compresi fra 0,35 e 0,5 V.

La corrente ottenibile da una **cella fotovoltaica** dipende dalla resistenza di carico collegata ai suoi capi, che dev'essere scelta in modo da ottenere la massima potenza di uscita, per una data illuminazione.

— La **cella solare** è una forma ottimizzata del fotodiodo, adattata a ricevere con grande efficienza la radiazione solare. L'area della cella solare è molto estesa, in modo da raccogliere la massima quantità di radiazione incidente possibile.

I **fototransistor** sono transistor incapsulati in contenitori provvisti di una lente, in plastica o in vetro trasparente, che permette alla radiazione incidente di agire sulla giunzione collettore-base. La radiazione sostituisce o incrementa, in funzione del circuito realizzato, la corrente di base nel transistor. Il coefficiente di amplificazione di corrente di questi dispositivi è quindi funzione dell'intensità della radiazione incidente.

I **fototiristori** (fotoscr, fototriac) sono elementi in cui la giunzione fotosensibile viene incorporata in una struttura a tiristore (LASCR). Il gate dell'LASCR è sensibile a una specifica radiazione luminosa: perché possa condurre è necessario sollecitarlo con una radiazione la cui intensità superi una soglia prefissata. In condizioni di buio il tiristore è spento.

I **fotoaccoppiatori** sono realizzati unendo in uno stesso contenitore un diodo led o IRED e un fotodiodo o fototransistor, entrambi con la stessa risposta spettrale. Quando il diodo led viene polarizzato direttamente, la radiazione emessa viene raccolta dal fotorivelatore, che a sua volta può entrare in conduzione.

— I **fotoaccoppiatori speciali** integrano nel ricevitore, oltre al fotorivelatore, componenti e circuiti sempre più complessi. Il fotorivelatore può essere inserito in un circuito che realizza un trigger di Schmitt con isteresi che consente di ottenere in uscita un segnale perfettamente squadrato ed esente da disturbi. Lo stadio di uscita è a collettore aperto e può essere interfacciato con semplicità con tutte le famiglie logiche.

CAPITOLO 6

Un sistema di trasmissione è costituito da una sorgente del messaggio da trasmettere (un segnale di natura elettrica digitale o analogica), da un mezzo di trasmissione e da un destinatario del messaggio in grado di riceverlo e di riconvertirlo in forma elettrica. Il mezzo di propagazione può essere una linea di trasmissione (cavo elettrico), l'etere o una fibra ottica.

La linea di trasmissione è costituita da un conduttore (termine usato per identificare quelle parti di un circuito o di una rete che sono destinate alla trasmissione della corrente elettrica). I conduttori elettrici più comuni hanno la forma di fili o di cavi elettrici.

— I fili impiegati come conduttori elettrici sono sottili tondini o filamenti di metallo, dotati di buona conducibilità e lavorabilità meccanica; possono essere nudi o rivestiti di una guaina di materiale isolante.

Un segnale trasmesso su una linea può essere perturbato da fenomeni di riflessione e da fenomeni di diafonia. La **riflessione** è il fenomeno per cui una frazione del segnale, in presenza di discontinuità nel cavo o dell'estremità del cavo, si riflette all'interno dello stesso. Il fenomeno non si verifica quando la **linea** è **adattata**, cioè quando l'impedenza caratteristica della linea di trasmissione è pari al valore della resistenza di carico; se l'impedenza caratteristica della linea è inferiore alla resistenza di carico, una frazione del segnale viene riflessa e va ad aggiungersi al segnale trasmesso; se invece l'impedenza della linea di trasmissione è superiore alla resistenza di carico, la porzione riflessa del segnale ne provoca l'attenuazione.

— Due conduttori adiacenti interagiscono mutuamente attraverso le induttanze e le capacità di accoppiamento, in modo che il segnale trasmesso da una linea appare anche sulla linea adiacente. Questo tipo di disturbo, detto **diafonia**, deve essere assolutamente minimizzato al fine di ottenere un corretto funzionamento dell'apparecchiatura che utilizza la linea di trasmissione per realizzare le sue interconnessioni.

Le **interferenze elettromagnetiche** (EMI), cioè gli accoppiamenti di segnali non richiesti da un sistema (origine del disturbo) a un altro (sistema disturbato), si devono a un accoppiamento: galvanico, induttivo, capacitivo per irradiazione o per carica elettrostatica. L'accoppiamento e/o il trasferimento di interferenze elettromagnetiche in un sistema o in un'apparecchiatura avvengono di norma attraverso i cavi di connessione.

I cavi ottici costituiscono un'ottima alternativa ai cavi elettrici coassiali e bipolari, perché presentano grandi vantaggi tecnici, quali l'immunità ai disturbi e alle radiazioni elettromagnetiche e un'alta capacità di trasmissione. Spesso i collegamenti ottici si rivelano più vantaggiosi dal punto di vista economico perché presentano costi di installazione minori.

Una fibra ottica è una guida d'onda cilindrica di materiale trasparente (vetro o plastica) con un diametro che va da 50 a 400 μm, costruita in modo che l'indice di rifrazione sia massimo in corrispondenza all'asse del cilindro (circa 1,5) e minimo sulla circonferenza (circa l'1% in meno). Si ricorda che l'indice di rifrazione di un mezzo trasparente è dato dal rapporto tra le velocità di propagazione della luce rispettivamente nel vuoto e nel mezzo.

La capacità di una fibra ottica di comportarsi da guida d'onda si basa sulla **legge di Snell** (o Snellius) e di Cartesio, che descrive i fenomeni di riflessione e di rifrazione che avvengono quando un'onda luminosa attraversa una superficie di separazione tra due mezzi trasparenti che possiedono indici di rifrazione differenti.

La fibra ottica è costituita da tre parti: 1) un nucleo (*core*) centrale di materiale trasparente (vetro o ceramica) a elevato indice di rifrazione; 2) un rivestimento o mantello (*cladding*) che avvolge il nucleo di materiale trasparente ed è caratterizzato da un indice di rifrazione leggermente inferiore a quello del nucleo; 3) una guaina di rivestimento (*coating*) opaca di materiale plastico che copre e protegge la fibra vera e propria.
Affinché si verifichi la riflessione totale dell'onda nella fibra è necessario che il raggio incida sulla superficie di separazione fra nucleo e mantello con un angolo superiore a quello critico.
Il raggio che proviene dalla sorgente entra nella fibra propagandosi in un mezzo che ha un suo indice di rifrazione n_0, per cui entrando nel nucleo della fibra, che ha un indice di rifrazione n_1, subisce una rifrazione; l'angolo di incidenza di questo raggio deve essere tale da rifrangerlo in modo che incida sulla superficie nucleo-mantello della fibra con un angolo superiore all'angolo critico così da ottenere la riflessione totale del raggio nel nucleo, e di conseguenza la sua propagazione.
Affinché si verifichi la condizione di riflessione totale dell'onda luminosa la stessa deve entrare nella fibra con un angolo inferiore a un valore limite $_l$ calcolabile, per la legge di Snell, tramite una equazione, nota come **apertura numerica** della fibra (NA).
— I più importanti parametri ottici limitanti sono l'attenuazione e la larghezza di banda. Entrambi dipendono dalle caratteristiche della fibra ottica e dalla composizione del cavo. L'attenuazione, cioè la perdita di energia luminosa su una data lunghezza, dipende dalla purezza del vetro e dalla diffusione della luce nello stesso.
— Il campo di impiego delle fibre ottiche per telecomunicazioni è quello delle lunghezze d'onda comprese fra 800 e 1600 nm (infrarosso prossimo alla luce visibile), in cui l'attenuazione è minima.
Le fibre ottiche presentano molti vantaggi rispetto ai collegamenti effettuati con i tradizionali cavi in rame: hanno una banda passante più elevata; permettono di gestire un maggior numero di canali di comunicazione; consentono di interporre una maggior distanza fra i ripetitori; realizzano un completo isolamento elettrico fra ingresso e uscita; manifestano un'immunità dalle interferenze elettromagnetiche; non provocano accoppiamenti indesiderati fra i vari cavi (**cross-talk**); sono immuni da intercettazioni; presentano dimensioni e peso ridotti; hanno dei costi in costante diminuzione.
I cavi ottici vengono sottoposti alle seguenti prove: attenuazione spettrale nel campo di lunghezza d'onda 600÷1600 nm; larghezza di banda fino a 1,8 GHz; apertura numerica; attenuazione locale a 850, 1300 o 1550 nm; cicli di temperature tra i 45 °C e i +70 °C; prova di trazione con registrazione dei valori di attenuazione.
Un sistema di comunicazione a fibre ottiche è costituito da tre parti: la sorgente ottica che trasduce l'informazione espressa in forma di segnale elettronico in un segnale luminoso, la fibra ottica che è il mezzo trasmissivo attraverso il quale si propaga il segnale luminoso e il ricevitore ottico che trasduce il segnale luminoso in un segnale elettrico.
Rispetto ai tradizionali sistemi di collegamento in cavo di rame, quello a fibra ottica offre molti vantaggi: la banda passante è più elevata; i ripetitori sono posti a maggiore distanza fra loro; l'isolamento elettrico fra sorgente e ricevitore è completo; il sistema è immune alle interferenze elettromagnetiche; non si verifica alcuna irradiazione termica; gli accoppiamenti fra i segnali (*cross-talk*) sono del tutto assenti; il segnale è immune alle intercettazioni; le dimensioni e il peso dei cavi sono più contenuti e i costi di installazione sono globalmente inferiori.
I sistemi di comunicazione a fibra ottica sono utilizzati prevalentemente nel campo delle telecomunicazioni (reti telefoniche pubbliche), nella reti locali per telematica (LAN-*Local Area Network*), nei servizi a banda larga (come la TV via cavo); nelle applicazioni industriali e nelle applicazioni militari (installazioni a bordo dei veicoli aerospaziali, linee di comunicazione riservata).
Le sorgenti luminose possono essere di due tipi: incoerenti (LED) o coerenti (LASER); ambedue sono facilmente modulabili e lavorano in bassa tensione.
I led utilizzati nei sistemi di comunicazione a fibra ottica sono costruiti con l'arseniuro di gallio e l'arseniuro di gallio alluminio (GaAlAs).
Il laser allo stato solido, un dispositivo ad elevata densità di corrente, è la sorgente preferita per i collegamenti a prestazioni elevate, nei quali sono importanti parametri quali la distanza di trasmissione e la larghezza di banda della trasmissione da effettuare. Nel diodo laser, quando la corrente di comando supera un certo valore di soglia, la generazione di luce è dovuta a emissione stimolata e non spontanea (come nei led).
— In questa zona di funzionamento un laser a stato solido genera un fascio luminoso di potenza ottica di qualche mW con un'efficienza quantica differenziale di circa il 30% e un tempo di risposta inferiore al nanosecondo. La larghezza di banda è limitata più dalle caratteristiche del circuito di comando che dal laser in sé.
La lunghezza massima di un collegamento con fibre ottiche è determinata dalla potenza della sorgente, dall'attenuazione della fibra e dalla potenza minima richiesta dal ricevitore.
I rivelatori sono dispositivi che effettuano la conversione da energia luminosa a energia elettrica, caratterizzati da valori di soglia di intervento che limitano la loro sensibilità. La minima potenza ricevibile è calcolabile con una complessa relazione matematica che lega il rapporto segnale-disturbo, la banda passante e l'energia luminosa, oppure utilizzando curve parametriche.
Le caratteristiche più importanti di un fotorivelatore sono: il rendimento, la velocità, il livello di rumore e la compatibilità fisica fra nucleo della fibra e la superficie del rivelatore.
I rivelatori di uso comune più utilizzati sono i fotodiodi PIN e i fotodiodi a valanga.

VERIFICHE

1.
Che cos'è un display a 7-segmenti? Quali sono le peculiari configurazioni circuitali che lo caratterizzano?

2.
Descrivi i principali tipi di display a cristalli liquidi ed elenca alcune applicazioni tipiche.

3.
Descrivi il principio di funzionamento di un display a plasma.

4.
Come funziona un laser?

5.
Definisci le caratteristiche fondamentali del fascio laser.

6.
Come funziona una cella solare? Quali sono le sue principali caratteristiche elettriche?

7.
Che cos'è un fotoaccoppiatore? Quali sono le forme costruttive più utilizzate?

8.
Elenca e descrivi le principali applicazioni di un fotoaccoppiatore precisando, per ciascuna di esse, quali sono i parametri elettrici statici e dinamici del fotoaccoppiatore più significativi.

9.
Che cos'è e a che cosa serve un relè allo stato solido?

10.
Per realizzare un interruttore crepuscolare è meglio impiegare un LDR o un fotodiodo? Motiva la risposta.

11.
Quali sono i parametri caratteristici dei cavi?

12.
Le fibre ottiche sfruttano il fenomeno fisico della riflessione totale per propagare un'onda luminosa. Descrivi il fenomeno.

13.
Quali vantaggi offre un collegamento realizzato con le fibre ottiche rispetto a quello realizzato con i tradizionali cavi in rame?

MODULO D

Dispositivi di conversione dell'energia elettromeccanica

CAP 7

MOTORI, ELETTROMAGNETI E ATTUATORI ACUSTICI

Prerequisiti

- Principali leggi dell'elettromagnetismo.
- Teoria delle reti in corrente continua e in corrente alternata.
- Principio di funzionamento dei motori in corrente continua e in corrente alternata.

Obiettivi

Conoscenze

- Parametri elettrici, statici, dinamici e meccanici dei principali attuatori utilizzati nell'automazione.
- Principio di funzionamento dei principali attuatori.
- Principali tecniche di pilotaggio degli attuatori più comuni.

Competenze

- Saper scegliere l'attuatore che meglio soddisfa le specifiche di progetto.
- Saper progettare, dimensionare e realizzare circuiti elettronici in grado di far funzionare in modo ottimale i diversi tipi di attuatore.

CAP 7 MOTORI, ELETTROMAGNETI E ATTUATORI ACUSTICI

Concetti chiave

- Coppia di spunto
- Coppia motrice
- Passo angolare
- Rotore
- Statore
- Velocità di sincronismo

1 Motori elettrici
2 Motori in corrente continua
3 Motori in corrente alternata
4 Motori universali e motori lineari
5 Motori passo-passo
6 Elettromagneti
7 Attuatori acustici

Gli attuatori sono dispositivi che permettono di effettuare conversioni di energia elettromeccanica. Le caratteristiche meccaniche dell'uscita del dispositivo dipendono dal segnale elettrico che è stato fornito in ingresso.

Nelle applicazioni elettroniche vengono impiegati come attuatori:

— motori in corrente continua, alternata, passo-passo;
— elettromagneti;
— attuatori acustici;
— relè.

Quando vi è la necessità di esercitare spinte dell'ordine delle decine di tonnellate si utilizzano **attuatori di potenza**, idraulici o pneumatici, comandati da elettrovalvole.

Le elettrovalvole sono dispositivi formati da una parte elettrica e da una parte idraulica. Nel caso delle **elettrovalvole on-off**, la parte elettrica può essere costituita da un elettromagnete; nel caso delle **elettrovalvole proporzionali**, la parte elettrica può essere un motore lineare o a corrente continua.

I relè, che abbiamo già ampiamente esaminato nel ***Volume 1***, ***Mod. C, Cap. 7***, scaricabile dal sito Internet, non vengono trattati in questo capitolo.

1 MOTORI ELETTRICI

Il motore elettrico è una macchina elettrica rotante che trasforma l'energia elettrica in energia meccanica; è costituito da una parte fissa, detta **statore**, e da una parte mobile, detta **rotore**, che può ruotare attorno a un asse. Le forze elettromagnetiche che lo statore esercita sul rotore creano una coppia motrice che agisce in un piano normale all'asse di rotazione. Tale coppia fa ruotare l'asse e, con esso, il carico meccanico che vi è collegato.

I motori elettrici possono essere classificati seguendo determinati criteri; i motori più comuni fanno riferimento: al tipo di funzionamento elettrico, alla variazione di velocità, al campo di applicazione, alle condizioni di montaggio.

- Classificazione secondo il **tipo di funzionamento elettrico**:
  — a corrente continua, a eccitazione indipendente o in derivazione (serie, parallela o *shunt*, composta);
  — a corrente alternata, sincroni, a induzione, a collettore, monofase e trifase.

I motori che trovano più largo impiego sono quelli a corrente alternata. I motori in corrente continua sono utilizzati quando l'applicazione richiede la regolazione della velocità di rotazione, oppure una coppia elevata anche in presenza di variazioni della tensione di alimentazione.

- Classificazione secondo la **variazione di velocità**:
  — a velocità costante;
  — a velocità regolabile;
  — a velocità variabile;
  — a velocità variabile e regolabile;
  — a più velocità.

- Classificazione secondo il **campo di applicazione**:
  — normali, che possono essere utilizzati nelle applicazioni più comuni;
  — speciali, che vengono realizzati con accorgimenti particolari per particolari condizioni ambientali o di impiego.

- Classificazione secondo le **condizioni di montaggio**:
  — per fissaggio a pavimento, a parete, a soffitto;
  — per accoppiamento frontale alla carcassa, per mezzo di una flangia;
  — ad albero verticale.

Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento del motore si basa sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica. Un conduttore percorso da corrente elettrica, posto in un campo magnetico, è soggetto all'azione di una forza la cui direzione è determinata dalla **REGOLA DELLA MANO SINISTRA** di Fleming, mentre il suo modulo è direttamente proporzionale alla densità di flusso magnetico, alla corrente che circola nella spira e alla lunghezza di quest'ultima (◗ ***Fig. 7.1***).

REGOLA DELLA MANO SINISTRA – Regola per cui se il pollice, l'indice e il medio della mano sinistra sono disposti ad angolo retto l'uno rispetto all'altro, con il medio nella direzione della corrente che circola in un filo e l'indice nella direzione di un campo magnetico all'interno del quale è posto il filo, il pollice indicherà la direzione della forza agente sul filo

Nei motori la **spira** è vincolata al centro, e quindi ai suoi estremi si originano due forze. Queste forze costituiscono una coppia (detta **coppia motrice** C_m) che mette in rotazione la spira. Invertendo la direzione della corrente si ha anche l'inversione del senso di rotazione.

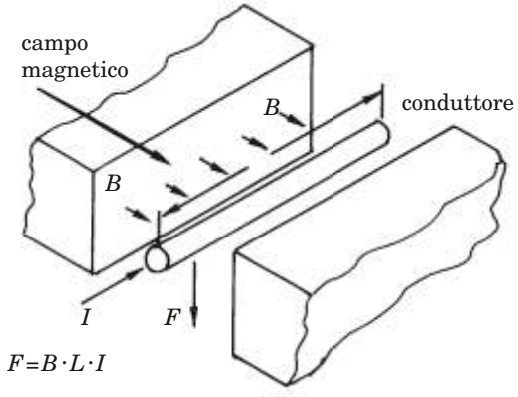


Fig. 7.1
Modello magnetodinamico.

Rappresentazione grafica del motore

Simbolo grafico e lettera di identificazione

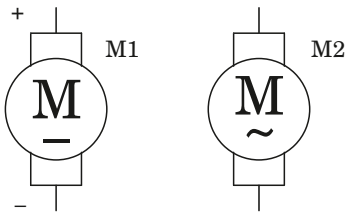
Le ***figure 7.2a, b*** mostrano il simbolo grafico utilizzato per il motore; la scritta interna caratterizza il tipo di motore e di funzionamento.

La lettera utilizzata per l'identificazione di un motore è la M.

Sigle commerciali e forme costruttive

Non esiste una norma che fissi un codice univoco per identificare le caratteristiche di un motore. Di solito il motore è provvisto di una targa (incollata o fissata con viti o chiodi) che ne riporta le caratteristiche principa-

Figg. 7.2a, b
Simbolo grafico del motore:
a. in corrente continua;
b. in corrente alternata monofase.

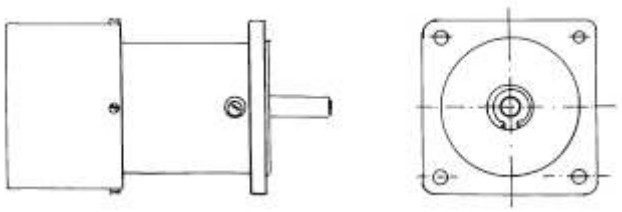


7.2a **7.2b**

li: tipo, tensione e potenza nominale, numero di giri, sigla commerciale del costruttore. A volte è riportata la sola sigla commerciale e il tecnico deve reperire le informazioni sui fogli tecnici forniti dal fabbricante.

Le forme costruttive sono molto varie e le dimensioni dipendono dalla potenza erogata, dal tipo di applicazione e dalle condizioni ambientali di impiego del motore (▸ ***Fig. 7.3***).

Fig. 7.3
Forma costruttiva di un motore.



7.3

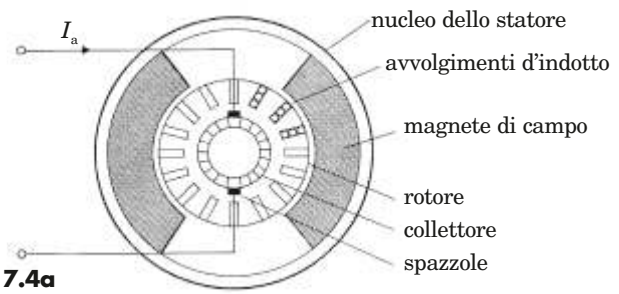
2 MOTORI IN CORRENTE CONTINUA

Un motore in corrente continua è una macchina elettrica costituita da due parti, una fissa (**statore**) e una mobile (**rotore**), e da un commutatore elettromeccanico costituito da un collettore a segmenti isolati fra loro e da una coppia di spazzole. L'asse del rotore si prolunga in un albero che, fuoriuscendo dal corpo del motore, permette la connessione dell'oggetto che dev'essere posto in rotazione (**carico meccanico**). La parte fissa della macchina genera il flusso magnetico, mentre la parte mobile, attraverso il controllo della corrente che attraversa le spire che vi sono avvolte, controlla la coppia motrice e la velocità di rotazione.

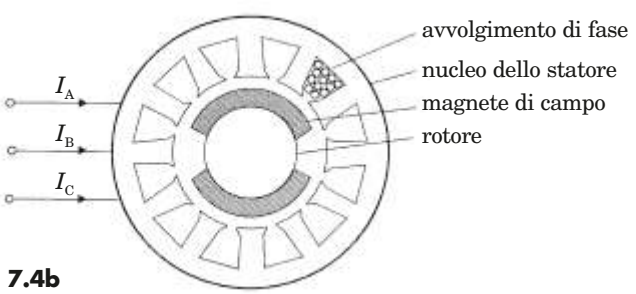
I motori in corrente continua differiscono fra loro per il modo con cui viene prodotto il flusso magnetico. Nei motori a magnete permanente (*permanent magnet motor*) il flusso viene creato da espansioni polari costituite da materiali magnetizzati (▸ ***Figg. 7.4a, b***), nei motori ad elettroindUzione magnetica il flusso viene generato da bobine avvolte su espansioni polari applicate allo statore. La corrente che attraversa la bobina (o le bobine) di statore è detta **corrente di eccitazione** e il flusso magnetico generato è il **flusso di eccitazione**.

Il rotore è in genere di forma cilindrica a struttura lamellare. In esso vengono ricavate delle cave in cui è alloggiato l'avvolgimento elettrico di rotore o di armatura, che fa capo mediante bandelle o lamelle a un collettore. Abbiamo visto che l'avvolgimento di rotore è la spira, esiste quindi il problema di far circolare la corrente nell'avvolgimento del rotore realizzando un collegamento, che deve essere stabile, fra una parte in movi-

Figg. 7.4a, b
Struttura di un motore in corrente continua (*fonte*: Philips):
a. con eccitazione a magneti permanenti;
b. senza spazzole.



7.4a



7.4b

mento (rotore) e una parte fissa (corpo del motore). La struttura lamellare del collettore assolve questo compito: la corrente elettrica viene applicata all'armatura per mezzo di due o più spazzole che strisciano sul collettore realizzando il collegamento fra la parte fissa e quella in movimento.

La ***figura 7.5*** propone la struttura semplificata di un motore in corrente continua a magneti permanenti costituita da un rotore a due spire (a, b) disposte a 90° fra loro. Attraverso le spazzole e il collettore a bandelle viene alimentata la spira a. Essendo immersa nel campo magnetico creato dal magnete permanente e percorsa da una corrente di armatura, la spira è soggetta all'azione di una forza che agisce perpendicolarmente al conduttore stesso e alle linee del campo magnetico. La spira, i cui due lati sono percorsi da correnti di verso opposto, è soggetta a una coppia che la fa ruotare; la coppia è massima nella posizione mostrata nel disegno e si annulla dopo una rotazione di 90°. La rotazione della spira (e del rotore con essa solidale) fa sì che anche le spazzole ruotino e che commutino, per mezzo del collettore, la tensione di alimentazione alla spira b, che a sua volta diviene sede di una coppia che fa ruotare il rotore di 90° provocando la commutazione dell'alimentazione alla spira a e il ciclo si ripete.

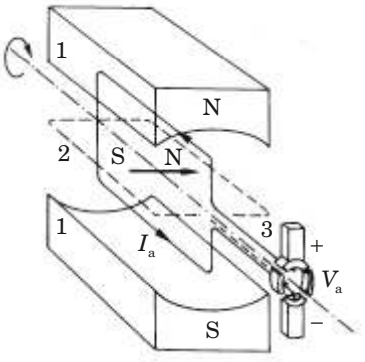


Fig. 7.5
Struttura del motore in corrente continua.

1 statore
2 rotore
3 collettore

La coppia generata non si mantiene costante durante la rotazione, ma conserva sempre lo stesso verso (in pratica un motore reale viene realizzato utilizzando un elevato numero di spire, o fasi, in modo tale che la coppia prodotta dal motore sia sostanzialmente costante e la rotazione uniforme). Il commutatore meccanico provvede ad attivare la fase del rotore, che di volta in volta è posizionata in modo da generare un campo magnetico perpendicolare a quello dello statore.

Le spazzole, soggette a una forte usura dall'attrito durante la rotazione, vengono realizzate in carbone o in materiali metallici preziosi; questi ultimi hanno il vantaggio di avere un lungo ciclo di vita e di consentire un miglior controllo della velocità, ma anche l'ovvio svantaggio del costo elevato.

Il rotore è realizzato in ferro o in plastica. Il tipo in plastica ha un valore di inerzia basso, per cui i motori che lo impiegano sono utilizzati quando è richiesto un tempo di risposta rapido (plotter e stampanti).

Caratteristiche elettromeccaniche del motore in corrente continua

Le caratteristiche elettromeccaniche di un motore in corrente continua sono descritte da alcune curve caratteristiche, tra cui:

— la **coppia motrice-velocità** (la velocità, in genere, viene espressa in numero di giri al minuto);
— la **coppia motrice-corrente di armatura**.

La coppia motrice fornita da un motore in corrente continua, con eccitazione indipendente e costante, vale:

$$C_m = K \cdot \Phi \cdot I_a \qquad 7.1$$

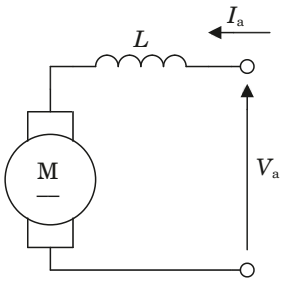
dove:

C_m è la coppia motrice misurata in newton al metro (N/m)
K è una costante (legge di Lenz)
Φ è il flusso di induzione magnetica generato dall'avvolgimento di eccitazione
I_a è la corrente di armatura circolante nell'indotto

Le curve caratteristiche del motore in corrente continua a induzione elettromagnetica dipendono dal sistema impiegato per generare la corrente di eccitazione, che può essere:

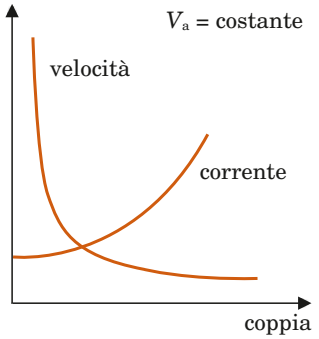
— **in serie** (▸ ***Figg. 7.6a, b***), se tutta la corrente di armatura interessa il circuito di eccitazione;

Figg. 7.6a, b
Sistema di eccitazione in serie; caratteristiche elettromeccanica e meccanica:
a. schema di principio;
b. curva velocità-coppia motrice e corrente-coppia motrice.



$V_a \cong e = K \cdot \Phi \cdot n$
$\Phi = K_v \cdot I_a$
per cui: $I_a \cdot n$ = costante

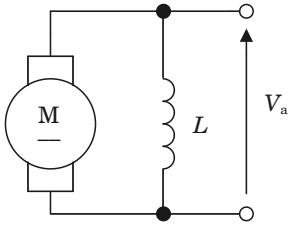
7.6a



7.6b

— **in parallelo** e **in derivazione** (▸ ***Figg. 7.7a, b***), se alla bobina di eccitazione viene applicata tutta la tensione di alimentazione;

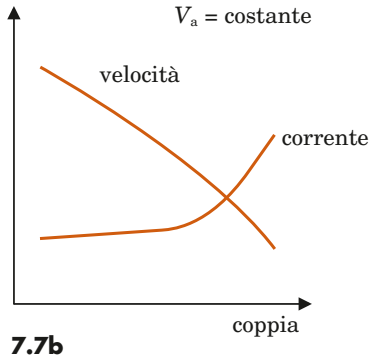
Figg. 7.7a, b
Sistema di eccitazione in parallelo; caratteristiche elettromeccanica e meccanica:
a. schema di principio;
b. curva velocità-coppia motrice e corrente-coppia motrice.



$C_m = K_1 \cdot \Phi \cdot I_a$

$$n = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{K \cdot \Phi}$$

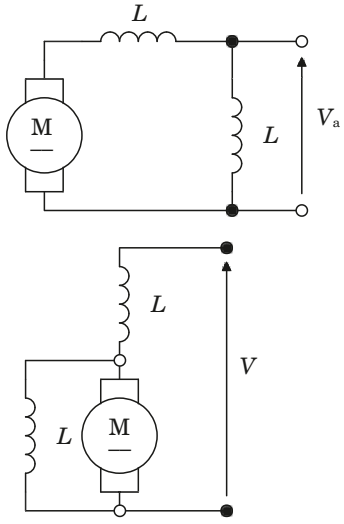
7.7a



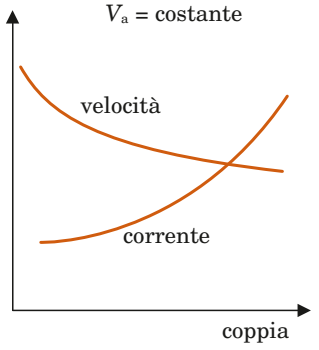
7.7b

— **composta** (▸ ***Figg. 7.8a, b***), se vengono realizzate entrambe le connessioni.

Figg. 7.8a, b
Sistema di eccitazione composta; caratteristiche elettromeccanica e meccanica:
a. schema di principio;
b. curva velocità-coppia motrice e corrente-coppia motrice.



7.8a



7.8b

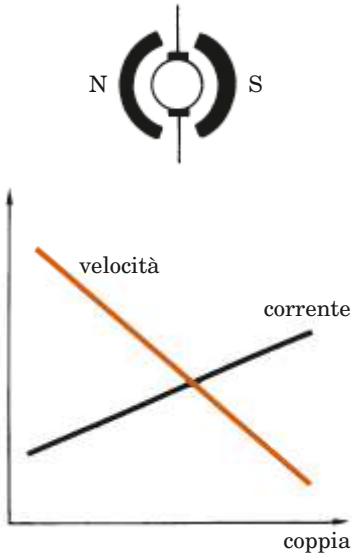
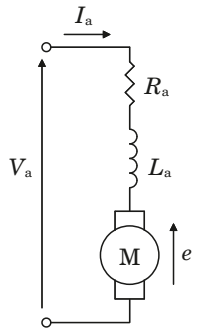


Fig. 7.9
Curve caratteristiche di un motore a magnete permanente.



$$V_a = R_a \cdot I_a + e$$
$$e = K \cdot w$$
$$C_m = K' \cdot I_a = (V_a - K \cdot w) \cdot \frac{K'}{R_a}$$

Fig. 7.10
Circuito equivalente di un motore in corrente continua a magnete permanente.

V_a	tensione di armatura (V)
R_a	resistenza di armatura (Ω)
L_a	induttanza di armatura (H)
I_a	corrente di armatura (A)
e	forza controelettromotrice (V)
w	velocità angolare di rotazione (giri/min)
C_m	coppia motrice (N/m)
K e K'	costanti di proporzionalità

Il motore in corrente continua con eccitazione in serie presenta da fermo una coppia elevata che tende a diminuire con l'aumentare della velocità; tale caratteristica è utile quando si devono spostare o sollevare carichi particolarmente pesanti. I motori in corrente continua con eccitazione in parallelo e ad eccitazione indipendente alimentati a tensione costante mantengono una velocità di rotazione pressoché costante al variare del carico meccanico collegato al loro asse, e quindi sono particolarmente indicati per pilotare pompe, ventilatori ecc. Il motore in corrente continua con eccitazione composta riunisce le caratteristiche dei due precedenti; viene utilizzato nei laminatoi per controllare la rotazione dei rulli di laminazione.

Nei motori a magnete permanente il flusso magnetico rimane praticamente costante per cui la corrente, e quindi la curva coppia elettromotrice-velocità, rimane costante per tutti i valori della corrente di armatura (▸ ***Fig. 7.9***).

Il senso di rotazione del motore viene invertito cambiando la direzione della corrente nell'avvolgimento d'indotto, mentre la velocità di rotazione viene regolata cambiando la tensione ai capi dell'avvolgimento di indotto (V_a), oppure variando la tensione di alimentazione dell'avvolgimento di eccitazione e, di conseguenza, il flusso di eccitazione.

La ***figura 7.10*** mostra il circuito equivalente e le principali relazioni che esprimono il funzionamento di un motore in corrente continua a magnete permanente. Le relazioni trascurano l'effetto dell'induttanza perché il motore è alimentato in continua e a regime tale effetto è nullo.

I principali parametri per individuare le caratteristiche di un motore in corrente continua sono:
— modo di eccitazione;
— velocità di rotazione misurata alla potenza nominale, in giri al minuto;
— potenza nominale (potenza meccanica massima disponibile all'albero in kilowatt);
— tensione di alimentazione (in volt);
— corrente assorbita alla potenza nominale (in ampere);
— limiti di variazione, se il motore viene fatto funzionare a velocità variabile;
— senso di rotazione dell'albero, che può essere orario o antiorario.

Le potenze nominali possono variare da pochi watt a qualche kilowatt. Le tensioni di alimentazioni più usate sono 6, 12, 24, 48, 60, 80, 110, 220, 440, 750, 1500, 3000 V_{dc}. I numeri di giri al minuto più utilizzati sono 750, 1000, 1400, 2000, 2800.

Motori senza spazzole

I motori senza spazzole (*brushless*) funzionano con lo stesso principio dei normali motori in corrente continua, ma in essi viene eliminato il commutatore meccanico a collettore, sostituito da un commutatore elettronico. Il motore brushless è formato da tre parti (▸ ***Fig. 7.11***):
— uno **statore** che porta tre avvolgimenti organizzati in tre fasi (A, B, C) disposte a 120°;
— un **rotore** a magnete permanente;
— un **commutatore** elettronico costituito da: un trasduttore di posizione di tipo ottico o magnetico (sensore a effetto Hall), un circuito logico di commutazione e interruttori elettronici (transistor).

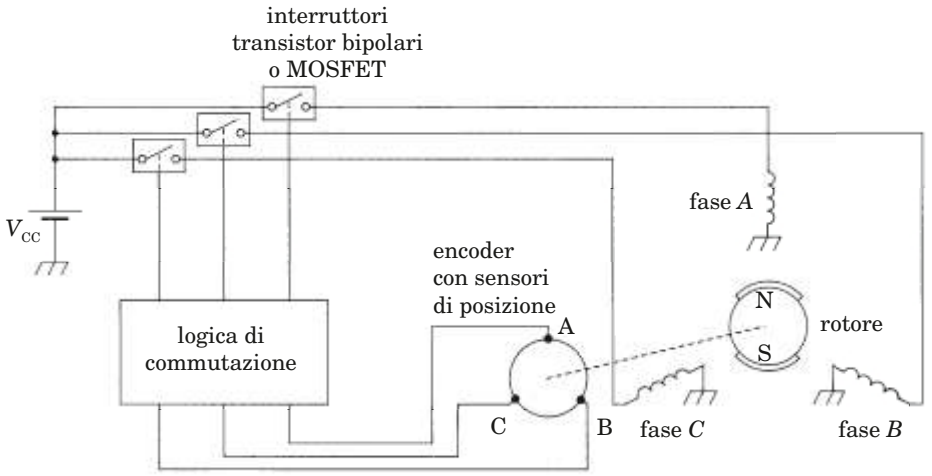


Fig. 7.11
Struttura di un motore senza spazzole (brushless).

Il tradizionale commutatore elettromeccanico del motore in corrente continua agisce sul circuito rotorico attivando la fase che consente, in ogni istante, di generare un campo magnetico perpendicolare al campo dello statore; il commutatore elettronico del motore brushless utilizza l'informazione sulla posizione del rotore, fornita dai trasduttori di posizione, per attivare la fase di statore che genera un campo magnetico perpendicolare a quello del rotore.

Il diagramma temporale della ***figura 7.12*** illustra la **sequenza di attivazione delle fasi** dello statore:

— in base alle informazioni fornite dai trasduttori di posizione, la logica di controllo attiva la fase *A* che, generando un campo magnetico perpendicolare al campo del rotore, crea una coppia motrice;
— dopo una rotazione di 120°, in base all'informazione dei sensori, la logica attiva la fase *B*;
— dopo un'ulteriore rotazione di 120° viene attivata la fase *C*.

La sequenza di attivazione delle fasi avviene ciclicamente, mantenendo praticamente costante la coppia motrice sviluppata dal motore. In realtà, durante la fase di attivazione di ciascuna fase, per la differente posizione reciproca dei campi magnetici (del rotore e dello statore), la coppia motrice prodotta subisce delle variazioni e tende ad assumere un andamento sinusoidale, ma con opportuni accorgimenti costruttivi questo effetto viene ridotto in modo che la coppia motrice sia costante durante tutta la fase di attivazione. La coppia motrice globale, somma dei tre effetti, è a sua volta costante.

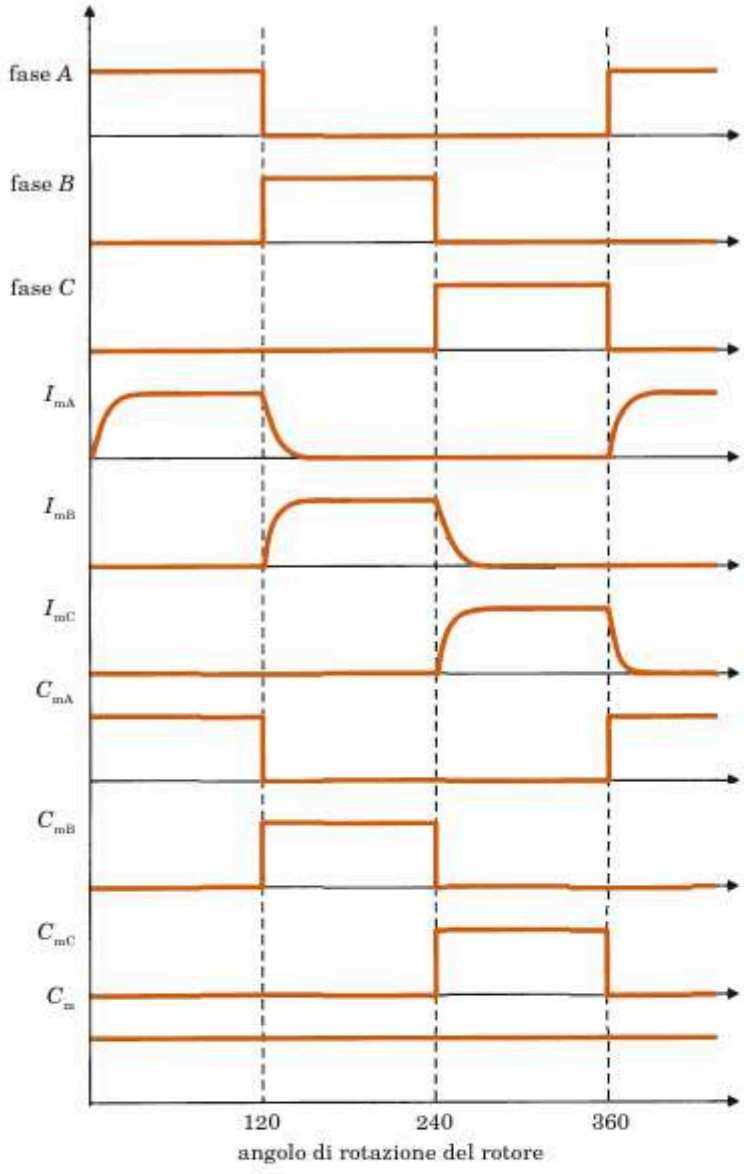
Nei motori reali gli avvolgimenti sono interconnessi con l'impiego del collegamento a triangolo e di quello a stella (▸ ***Figg. 7.13a, b***), e il rotore, diversamente da come abbiamo ipotizzato nel circuito preso ad esempio per la descrizione del funzionamento, possiede due **coppie polari** e non una. La presenza delle due coppie polari fa sì che per ogni giro del motore le singole fasi vengono coinvolte due volte, cosicché l'angolo elettrico è doppio rispetto a quello meccanico.

In generale la relazione esistente fra angolo elettrico α_e e angolo meccanico α_m è funzione del numero di poli p:

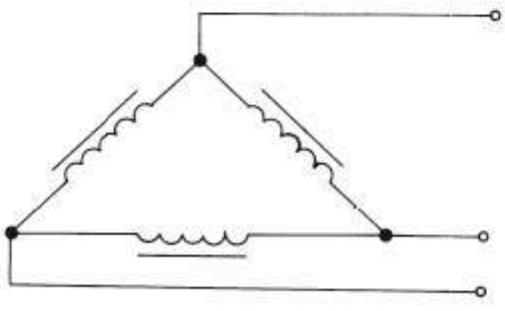
$$\alpha_e = \alpha_m \cdot p$$

7.2

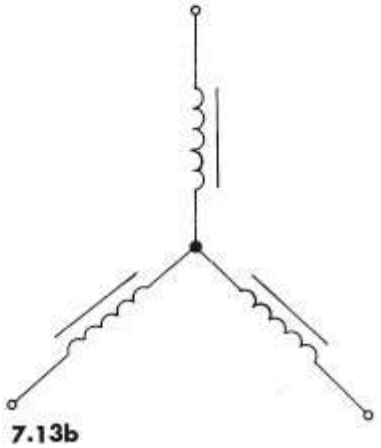
Fig. 7.12
Diagramma temporale delle caratteristiche di un motore brushless.



Figg. 7.13a, b
Collegamento degli avvolgimenti di un motore brushless:
a. a triangolo;
b. a stella.



7.13a



7.13b

I motori brushless, benché più complessi dei motori in corrente continua tradizionali, offrono maggiore affidabilità e rendimento più elevato, richiedono minore manutenzione; dispongono di una coppia di spunto elevata e hanno una buona velocità di risposta. Sono utilizzati nelle macchine a CN per azionare carri o mandrini, nelle periferiche per elaboratori, nei robot industriali. Il controllo di velocità viene effettuato agendo sul valore della tensione di alimentazione, con tecniche lineari o a **modulazione di impulsi** (PWM), o direttamente sui segnali che controllano le singole fasi.

Regolazione dei motori in corrente continua

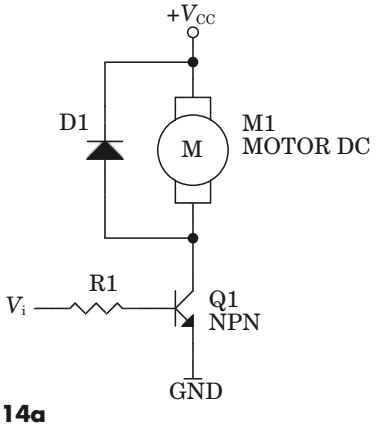
All'avviamento, le macchine in corrente continua tendono ad assorbire una corrente cinque o sei volte maggiore del valore nominale. Ciò avviene perché a motore fermo ed eccitato la forza controelettromotrice è nulla, per cui la corrente di armatura è limitata dalla sola resistenza dell'avvolgimento. Il metodo classico per ridurre questo effetto prevede l'impiego di un reostato che mantiene all'accensione la corrente entro limiti accettabili e poi, al crescere della forza controelettromotrice, viene progressivamente escluso.

Pilotaggio on-off

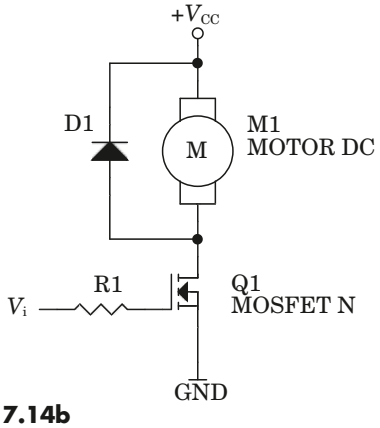
I due circuiti delle ***figure 7.14a***, ***b*** utilizzano due dispositivi di potenza, rispettivamente un transistor bipolare e un MOSFET a canale N ad arricchimento, per controllare la corrente circolante nel motore. In assenza della tensione di ingresso i transistor sono interdetti, e in presenza di un'opportuna tensione di ingresso V_i si portano in condizione di saturazione.

I diodi proteggono i transistor dalle sovratensioni provocate dalla componente induttiva dell'avvolgimento del motore.

Figg. 7.14a, b
Collegamento del motore nel funzionamento on-off:
a. elemento di commutazione: un transistor bipolare;
b. elemento di commutazione: un transistor MOS a riempimento.



7.14a



7.14b

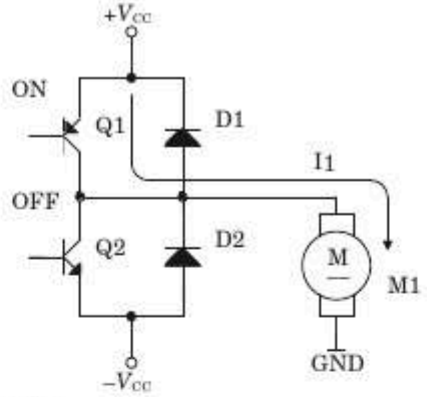
Inversione del senso di rotazione

L'inversione del senso di rotazione in un motore in corrente continua viene ottenuta invertendo la polarità della tensione di alimentazione applicata.

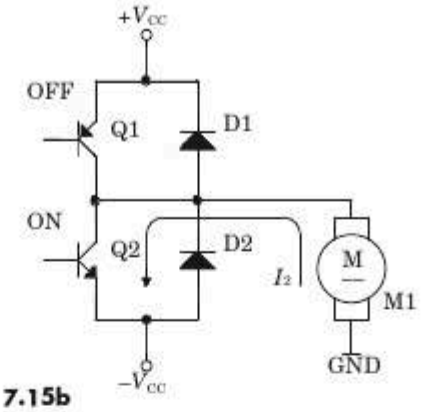
Il circuito delle ***figure 7.15a***, ***b*** è detto **a semiponte** e richiede che i due transistor siano posti dai segnali di comando in saturazione (on), l'uno, e in interdizione (off), l'altro.

Il circuito delle ***figure 7.16a***, ***b*** è detto **a ponte** e richiede una tensione di alimentazione singola. Se si pone in conduzione la coppia di transistor Q1 e Q4, e in interdizione la coppia Q2 e Q3, il motore ruota in una direzione; se si inverte lo stato delle due coppie la rotazione si inverte. Come nei circuiti precedenti, i diodi proteggono i transistor dalle sovratensioni provocate dalla componente induttiva dell'avvolgimento del motore.

Figg. 7.15a, b
Collegamento a semiponte:
a. senso di rotazione orario;
b. senso di rotazione antiorario.

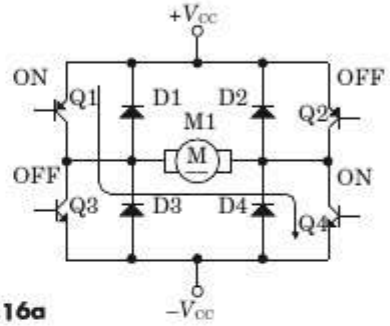


7.15a

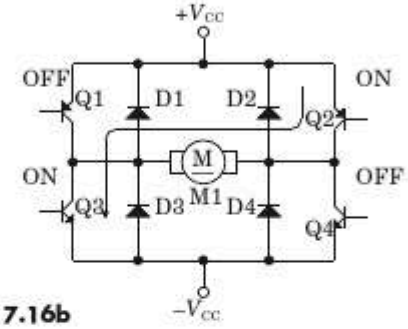


7.15b

Figg. 7.16a, b
Collegamento a ponte (H-bridge):
a. senso di rotazione orario;
b. senso di rotazione antiorario.



7.16a

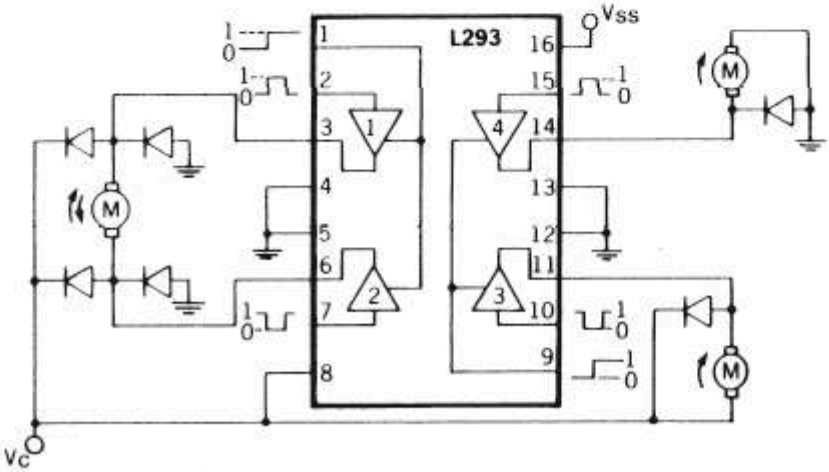


7.16b

I circuiti proposti come esempio, realizzati a componenti discreti, si limitano a realizzare lo stadio di potenza del circuito di controllo; in pratica, i circuiti di controllo usano circuiti integrati monolitici che contengono, oltre allo stadio di potenza, anche i circuiti di protezione dai sovraccarichi, dai cortocircuiti e dagli effetti della temperatura elevata (*thermal shutdown*).

La ***figura 7.17*** mostra lo schema funzionale di un circuito integrato progettato per pilotare motori che assorbono fino a 1 A. Il segnale di ingresso è TTL compatibile, per cui il circuito può essere pilotato direttamente da un circuito micrologico. Il circuito integrato è provvisto anche di due segnali di inibizione che agiscono, separatamente, su una delle due coppie di dri-

Fig. 7.17
Schema funzionale del dispositivo L293 (*fonte*: SGS).

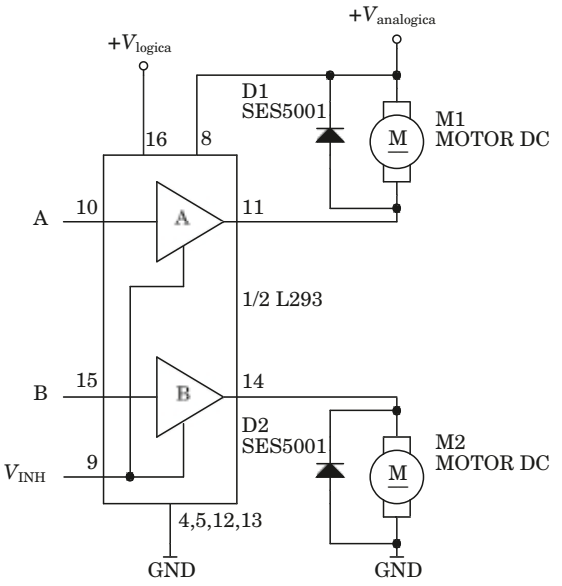


Note: Output diodes are internal in L293D.

ver, portandoli entrambi in alta impedenza e scollegando così il motore. Il dispositivo è dotato di un circuito di protezione dal surriscaldamento.

Le ***figure 7.18*** e ***7.19*** mostrano due circuiti applicativi.

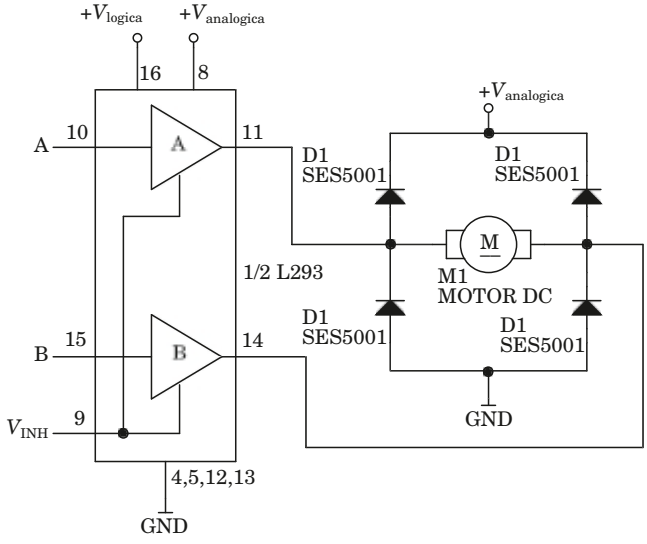
Fig. 7.18
Schema di connessione dei driver del circuito integrato L293 per il funzionamento on-off unidirezionale (*fonte*: SGS).



V_{INH}	A	M1	B	M2
H	H	FAST MOTOR STOP	H	RUN
H	H	RUN	H	FAST MOTOR STOP
L	X	MOTOR STOP	X	MOTOR STOP

L: low; H: high; X: don't care.

Fig. 7.19
Schema di connessione dei driver del circuito integrato L293 per il funzionamento on-off bidirezionale (*fonte*: SGS).



V_{INH}	A B	M1
H	H L	RUN -TURN LEFT
	L H	RUN -TURN LEFT
	L L	FAST MOTOR STOP
	H H	FAST MOTOR STOP
L	X X	MOTOR STOP

L: low; H: high; X: don't care.

Regolazione della velocità

La regolazione della velocità in modo continuo viene effettuata regolando la tensione applicata al motore. La ***figura 7.20*** mostra un semplice circuito di regolazione che utilizza un transistor bipolare polarizzato in zona attiva per variare la tensione applicata al motore. L'elemento di regolazione può essere sostituito da un transistor MOSFET di potenza o da una coppia di transistor bipolari in connessione Darlington, oppure da un amplificatore operazionale di potenza. Lo schema proposto non è in grado di stabilizzare la velocità di rotazione al variare delle condizioni di carico.

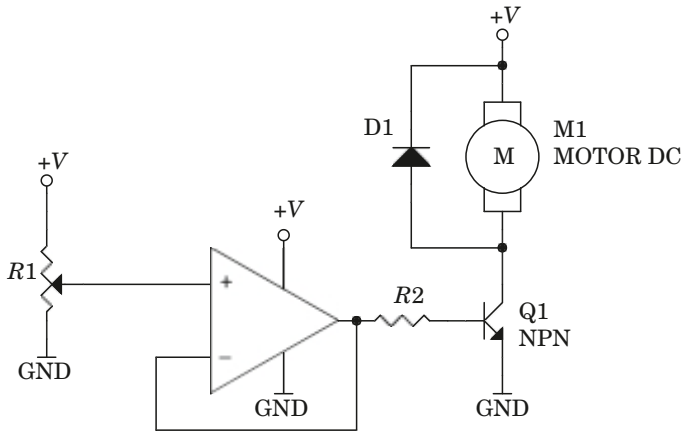


Fig. 7.20
Controllo di velocità.

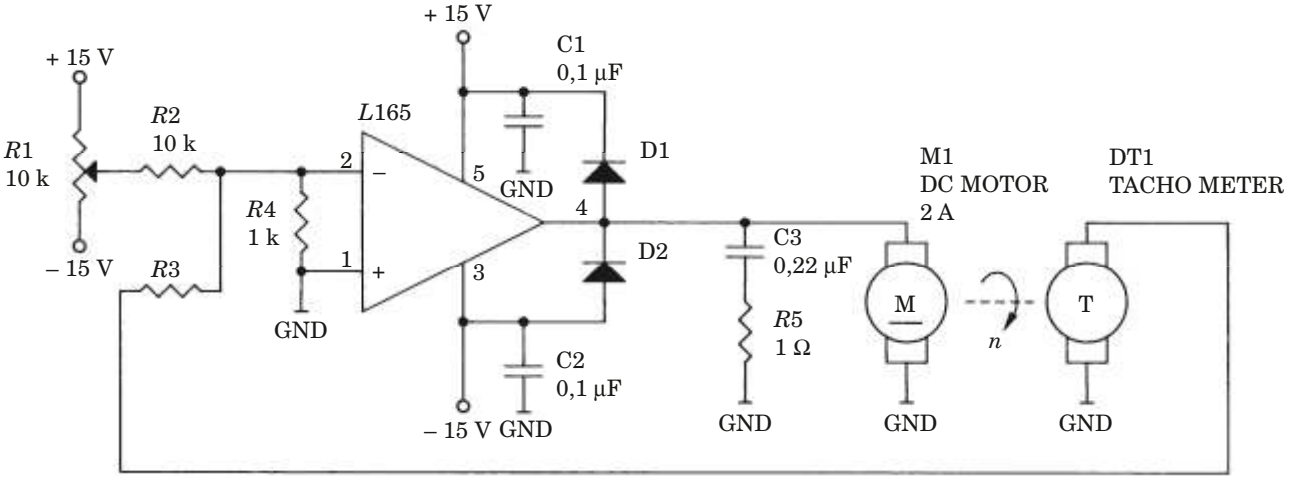
P_D potenza dissipata
V_a tensione di armatura
I_a corrente di armatura

$P_D = (V - V_a)\, I_a$

Lo schema della ***figura 7.21*** misura la velocità di rotazione dell'albero per mezzo di una **dinamo tachimetrica** e modifica la conduzione dell'elemento di regolazione in modo da mantenere la velocità di rotazione costante. La dinamo tachimetrica fornisce, in uscita, una tensione proporzionale alla velocità di rotazione dell'albero del motore; tale segnale va a sommarsi al segnale di riferimento fornito dal partitore. Un aumento di velocità del motore provoca la riduzione del segnale di uscita dell'amplificatore (l'amplificatore è invertente), e quindi la diminuzione della velocità del motore; il circuito reagisce in modo opposto se la velocità del motore diminuisce. Con questo metodo di pilotaggio dei motori in corrente continua, la potenza dissipata dal transistor di regolazione può

Fig. 7.21
Controllo automatico della velocità.

$V_a = K_D\, n$



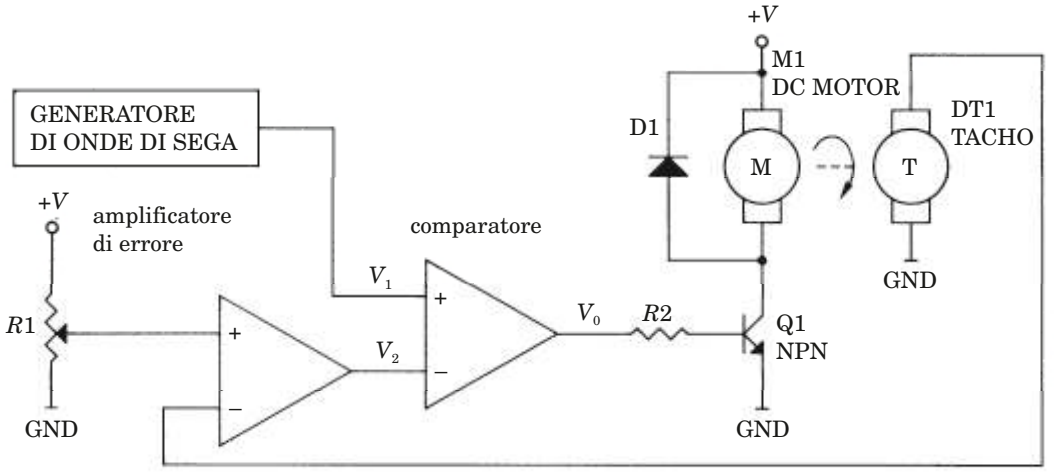
assumere valori molto elevati quando l'albero del motore ruota a basse velocità con una coppia elevata, dato che la corrente di armatura assume valori assai elevati (7.1).

Regolazione della velocità PWM

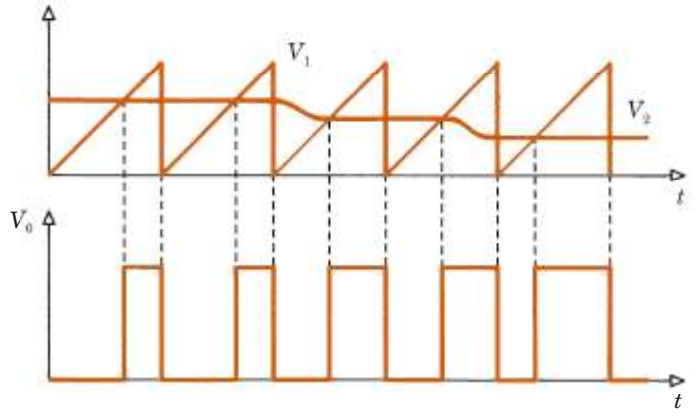
La regolazione elettronica della velocità di un motore in corrente continua può essere realizzata anche alimentando il motore con un segnale impulsivo di frequenza adeguata e controllando il tempo di conduzione (*duty-cycle*) nel periodo; la tensione di alimentazione non viene applicata al motore con continuità, ma solo per brevi periodi di tempo. In questo modo si può variare il valore della corrente di armatura. Poiché la velocità di rotazione è direttamente proporzionale alla corrente di armatura, si può regolare la velocità del motore variando il tempo di conduzione nel periodo. È la tecnica di regolazione della velocità del motore detta a **modulazione di impulsi** (PWM).

Le ***figure 7.22a***, ***b*** mostrano lo schema di principio di un sistema di controllo automatico a modulazione di impulsi. Questo tipo di controllo riduce la dissipazione del dispositivo di potenza che pilota il motore.

Figg. 7.22a, b
Controllo di velocità PWM:
a. schema di principio;
b. andamento dei segni di ingresso e di uscita.



7.22a



7.22b

Uno dei circuiti integrati più utilizzati per realizzare controlli PWM è il dispositivo L292 (SGS, Unitrode); la ***figura 7.23*** ne mostra lo schema funzionale. Lo stadio di uscita è connesso a ponte e può pilotare un motore che assorba 2 A con una tensione di alimentazione di 36 V_{dc}. Il dispositivo è incapsulato in un contenitore di potenza Multiwatt-15 di tipo orizzontale.

Il dispositivo L292 fornisce al motore una corrente direttamente proporzionale alla tensione applicata al suo ingresso:

$$I_m = G\,V_1 \qquad (7.3)$$

dove:

G = 220 mA/V è la transconduttanza del circuito integrato

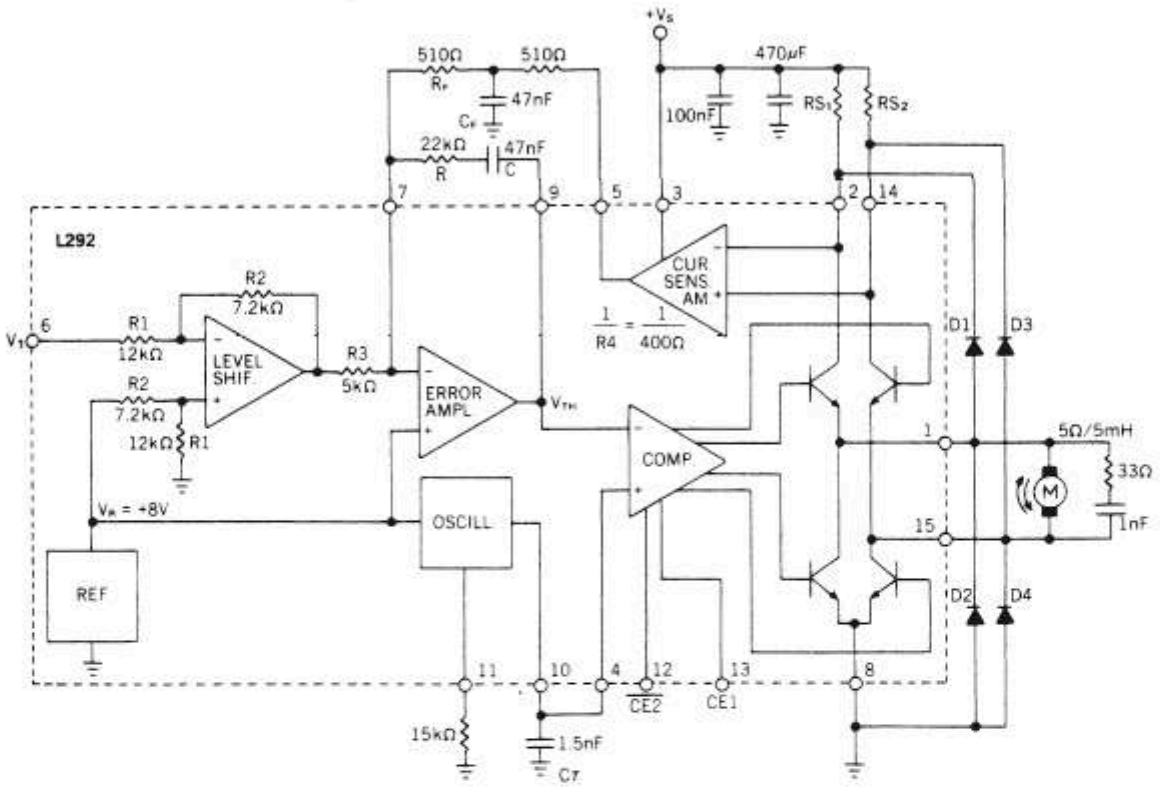


Fig. 7.23
Schema funzionale del dispositivo L292 (*fonte*: SGS).

La ***figura 7.24*** mostra lo schema funzionale di un regolatore PWM che utilizza il dispositivo L292 per interfacciare il motore. Lo schema è analogo a quello delle figure 7.22a, b; il circuito integrato contiene l'oscillatore, il comparatore e lo stadio di uscita.

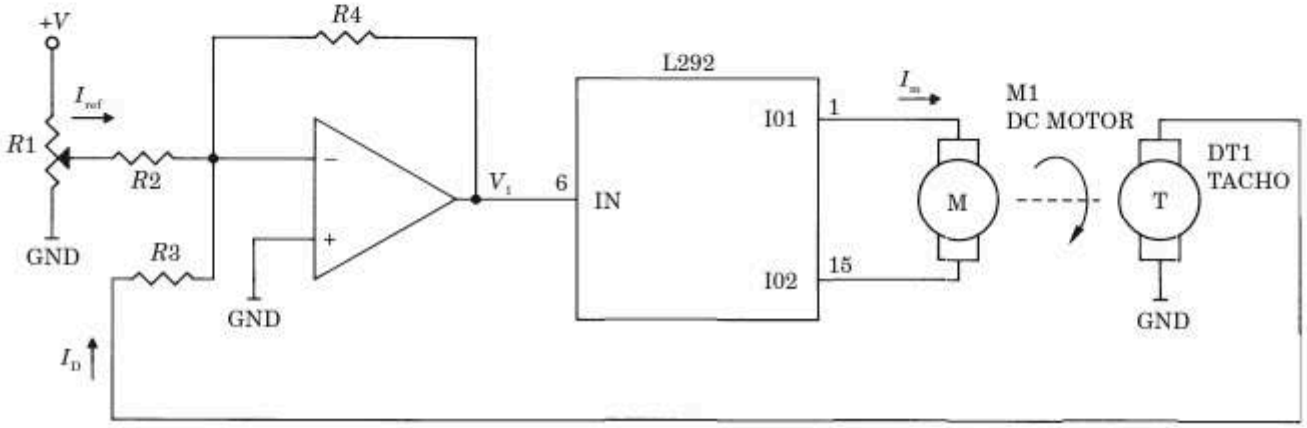


Fig. 7.24
Controllo di velocità PWM che utilizza il circuito integrato L292.

Molti costruttori hanno in catalogo i cosiddetti **driver di potenza**: una categoria di circuiti integrati capaci di interfacciarsi direttamente con carichi a bassa impedenza quali i motori in corrente continua. Questa caratteristica permette di interfacciare facilmente reti logiche, microprocessori e carichi a bassa impedenza, con il vantaggio di evitare l'assemblaggio di circuiti complessi e l'uso di particolari interfacce; il costo dell'apparecchiatura di controllo risulta ridotto, l'affidabilità è maggiore e i tempi di progettazione e di realizzazione sono più brevi.

Nel caso del pilotaggio di circuiti a ponte o a semiponte non è richiesto l'impiego di alcun traslatore di livello e, in caso di interfacciamento con transistor MOSFET, non è necessario alcun circuito addizionale (◗ ***Mod. B, Cap. 2***) per la *pompa di cariche* richiesta per ottenere la tensione di gate dei transistor che controllano un carico connesso a massa (caso tipico di un circuito per applicazioni automobilistiche).

I driver di recente produzione sono autoprotetti contro il cortocircuito in uscita, la sovratensione e i picchi dovuti alle interferenze elettromagnetiche EMI all'ingresso, il surriscaldamento e la sovratensione di uscita; si arrestano in caso di sottotensione all'ingresso per evitare false commutazioni e sono in grado di rilevare condizioni di funzionamento anomale (segnali di pilotaggio discordanti) e di segnalare su un'apposita linea di segnalazione (*fault*) lo stato del carico (sconnessione, interruzione della linea di massa o di ingresso, intervento delle protezioni).

I driver di potenza sono suddivisi dai costruttori, in funzione del modo con cui vengono utilizzati, nelle seguenti categorie:

— driver *high-side* o *low-side*, a seconda che il carico sia connesso verso massa o verso l'alimentazione;
— driver a semiponte o a ponte intero;
— gate driver per il pilotaggio di transistor MOSFET;
— driver per relè, solenoidi, iniettori, elementi riscaldatori, lampade;
— driver per il controllo dei motori (*motor controller*), utilizzati come driver generici anche per altri tipi di carico.

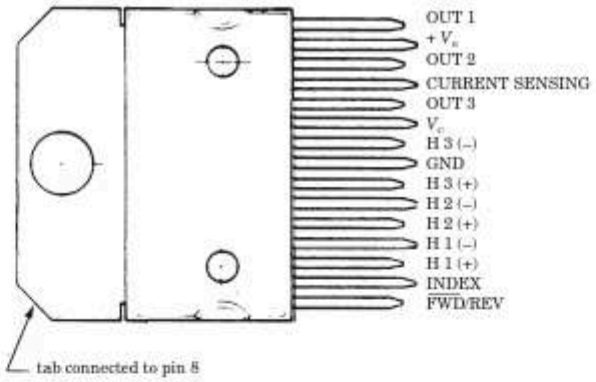
Fra i molti dispositivi disponibili in commercio si segnala, per le sue caratteristiche innovative, il driver quadruplo high-side LMD18400 della National Semiconductors, capace di pilotare carichi che richiedono una tensione di alimentazione di 60 V e una corrente massima di un ampere; è provvisto di un'interfaccia seriale in grado di fornire 11 segnalazioni di funzionamento anomalo (cortocircuito del carico, superamento della tensione di alimentazione ecc.).

Pilotaggio dei motori brushless

Il circuito elettronico capace di elaborare l'informazione proveniente dai sensori di posizione e di attuare il pilotaggio delle fasi del motore brushless è in genere realizzato utilizzando circuiti integrati specifici. Il dispositivo L6230 (◗ ***Fig. 7.25***), prodotto dalla SGS, è stato progettato per il controllo bidirezionale di motori brushless a tre fasi ed è incapsulato in un contenitore (*package*) di potenza Multiwatt-15 di tipo orizzontale (◗ ***Fig. 7.26***). Gli stadi di uscita del dispositivo sono in grado di erogare fino a 3 A di corrente con tensioni di alimentazione di 18 V.

Il dispositivo L6230 accetta segnali di tipo differenziale da sensori a effetto Hall (◗ ***Mod. A, Cap. 1***), possiede tre uscite che possono essere utilizzate per motori i cui avvolgimenti siano connessi in configurazione a

Fig. 7.25
Diagramma delle connessioni del circuito integrato L6230; visione dall'alto (*fonte*: SGS).



7.25

Fig. 7.26
Contenitore Multiwatt-15.

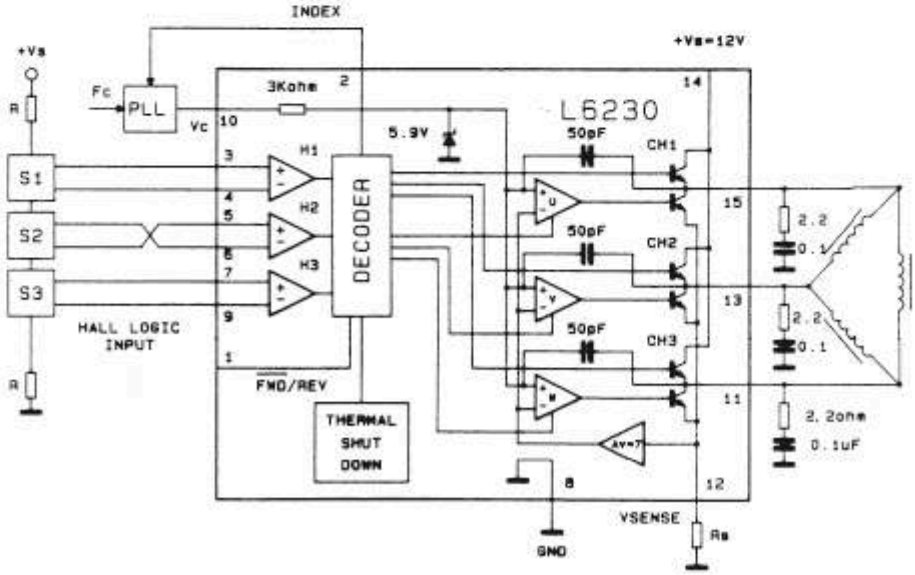
7.26

delta (triangolo) oppure a stella (il centro della stella dev'essere lasciato sconnesso). Per ridurre i disturbi elettromagnetici (EMI) che genera lo si fa operare in modo lineare e si limitano i tempi di salita e di discesa del segnale in uscita a uno slew rate di 0,1 V/μsec.

La ***figura 7.27*** mostra lo schema funzionale interno del dispositivo in un'applicazione in cui le fasi del motore sono collegate a delta. Gli impulsi di controllo della velocità provengono da tre sensori a effetto Hall, ma è possibile utilizzare anche un convertitore frequenza-tensione o un oscillatore ad aggancio di fase (PLL). Nel secondo caso i segnali di controllo proporzionali alla velocità (segnale di tipo analogico) vanno applicati a un apposito ingresso di controllo (pin 10) che accetta segnali di tipo lineare e agisce direttamente sulla soglia di commutazione dei tre comparatori che pilotano i transistor di uscita inferiori, limitando così la corrente che circola negli avvolgimenti e, di conseguenza, la velocità del motore. Questo tipo di regolazione è possibile perché i transistor superiori di uscita, quando viene inviato il comando di fase, sono posti in saturazione, mentre quelli inferiori operano in zona lineare, e si può regolare la loro conduzione in funzione della velocità desiderata.

PLL
– Phase locked loop

Fig. 7.27
Diagramma a blocchi del circuito integrato L6230 (*fonte*: SGS).



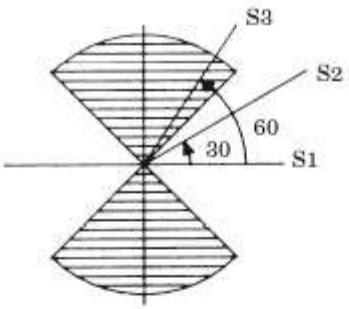
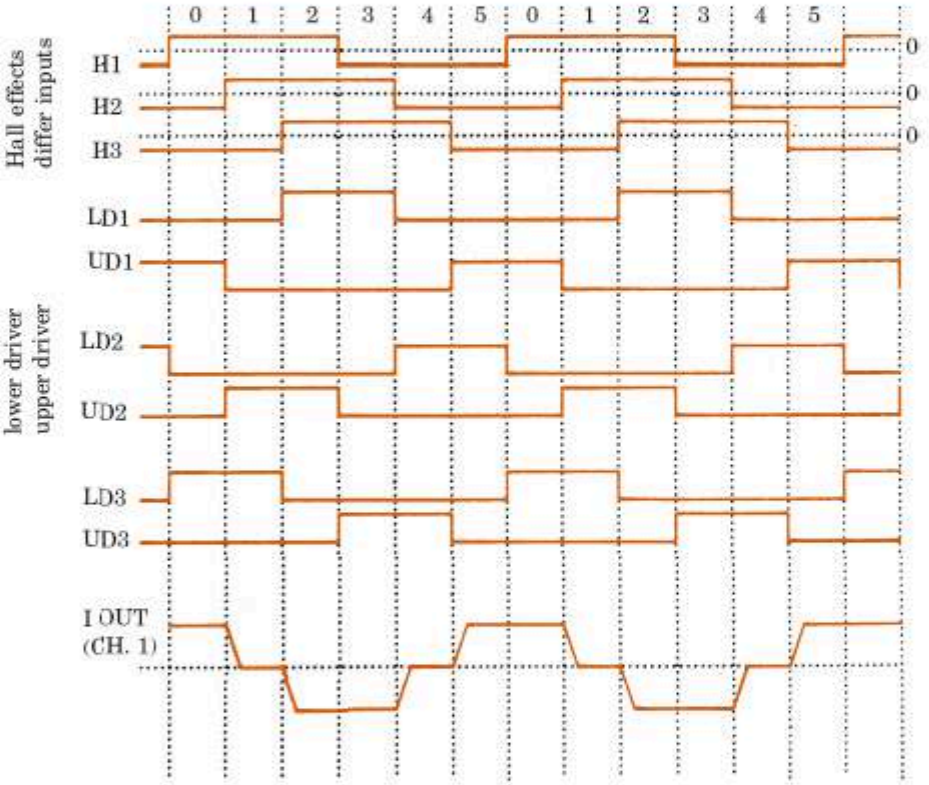


Fig. 7.28
Posizione dei sensori di posizione a effetto Hall e disco di codifica.

Il dispositivo genera un segnale di uscita (pin 2), proporzionale alla velocità del motore, che permette di realizzare un sistema di regolazione automatico della velocità, per esempio un oscillatore ad aggancio di fase (PLL). L'altro ingresso dei comparatori preleva la propria tensione di controllo dall'ingresso VSENSE (pin 12), connesso a un resistore che, collegato in serie con i transistor di uscita, misura e limita la corrente circolante. Lo stadio di uscita è inoltre progettato in modo tale da impedire che i due transistor (superiore e inferiore) di ciascun stadio di uscita possano entrare in conduzione simultaneamente. Il segnale di tipo logico fornito al pin 1 permette di controllare la sequenza di attivazione delle fasi e di determinare il senso di rotazione del motore.

L'informazione derivata dai sensori di posizione di Hall è ottenuta posizionandoli a intervalli di 30° in una maschera che presenta due settori (finestre) della larghezza di 90° (▸ ***Fig. 7.28***). Il diagramma temporale della ***figura 7.29*** mostra le forme d'onda prodotte dal dispositivo elettronico.

Fig. 7.29
Diagramma temporale che usa in input i diversi effetti Hall; l'intervallo evidenziato sull'ascissa è di 30° (*fonte*: SGS).



PER FISSARE I CONCETTI

1. Che cos'è un attuatore?
2. Descrivi il funzionamento di un motore in corrente continua.
3. Quali sono le principali caratteristiche di un motore?
4. Quali sono le principali caratteristiche di un motore brushless?
5. Come si effettua la regolazione di velocità di un motore in corrente continua?
6. Descrivi il metodo di regolazione della velocità PWM.

3 MOTORI IN CORRENTE ALTERNATA

Il motore elettrico in corrente alternata è una macchina che trasforma l'energia elettrica in energia meccanica. Esistono tre tipi di motori in corrente alternata:

1. motori a induzione o asincroni, monofase e polifase;
2. motori sincroni;
3. motori a collettore.

Motori a induzione

Nei motori a induzione lo statore è alimentato direttamente dalla linea, mentre negli avvolgimenti del rotore circola una corrente prodotta per induzione dato che i conduttori del rotore intersecano le linee del flusso magnetico generato dallo statore. Il principio di funzionamento del motore a induzione si basa sul **campo magnetico rotante** scoperto nel 1888 da Galileo Ferraris. Il campo magnetico rotante è prodotto dal circuito statorico quando viene alimentato da un sistema di tensioni eguali, in modulo e in frequenza, ma sfasate di 90 gradi elettrici se monofase e di 120 gradi elettrici se trifase.

La ***figura 7.30*** mostra la relazione tra coppia e numero di giri (velocità di rotazione). C_{sp} è la **coppia di spunto**, cioè la coppia che la macchina genera per porre in rotazione l'albero del motore partendo con il rotore fermo; n_s è la **velocità di sincronismo**, cioè la velocità a cui il rotore è in sincronismo con il campo magnetico rotante prodotto dallo statore. Quando la velocità di rotazione è pari alla velocità di sincronismo la coppia si annulla, perché il rotore non è più soggetto a variazioni di flusso magnetico e quindi non è più interessato da correnti indotte. Le altre variabili utilizzate nella figura 7.30 sono: C_m **coppia massima**, C_{sat} **coppia di saturazione**, C_n **coppia nominale**, n_n **numero di giri nominale**.

Lo sfasamento di 90 gradi elettrici fra le tensioni è necessario per permettere al motore di generare una coppia torcente tale da vincere le resistenze passive e portarlo a lavorare al di là del ginocchio della curva coppia-velocità, cioè in condizioni di stabilità. Questo sfasamento può essere ottenuto con un condensatore (motore ad avviamento capacitivo) o con un resistore. Il condensatore può essere inserito permanentemente (*permanent split capacitor*), oppure può essere sconnesso dopo l'avviamento mediante un relè o un PTC.

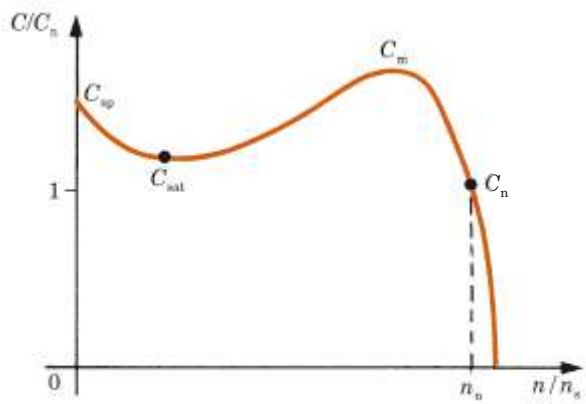


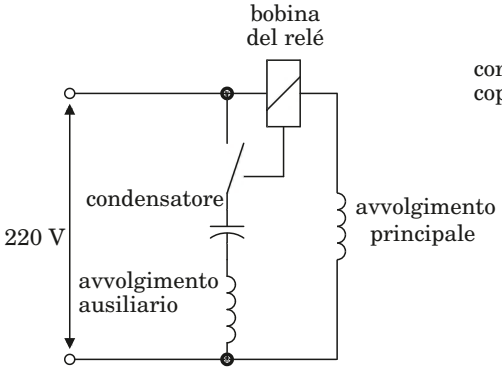
Fig. 7.30
Curva coppia-numero di giri per un motore asincrono.

C_{sp} coppia di spunto
C_{sat} coppia di saturazione
C_m coppia massima
C_n coppia nominale
n_n numero di giri nominale
n_s velocità di sincronismo

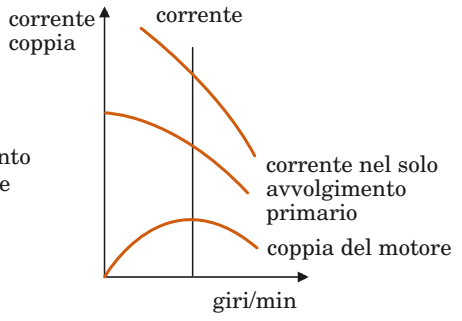
Il condensatore permanentemente inserito è soggetto a una tensione doppia rispetto a quella di alimentazione del motore e in presenza di una coppia di spunto elevata il valore della sua capacità diventa elevato; sono di norma usati condensatori a carta impregnata in olio per le loro buone caratteristiche di isolamento.

Il motore con condensatore di avviamento ha due avvolgimenti: quello principale è costantemente connesso alla rete, mentre quello di avviamento ausiliario viene inserito per pochi secondi in fase transitoria (▸ ***Figg. 7.31a, b***) e disinserito appena il motore raggiunge la velocità di regime. Il relè che attiva l'inserzione presenta un contatto normalmente aperto in serie all'avvolgimento ausiliario ed è tarato in modo tale che alla **corrente di spunto** (*pick up current*) il nucleo mobile viene attratto e chiude il contatto; il motore entra in rotazione e la corrente di armatura diminuisce; quando raggiunge il **valore di sgancio** (*drop out current*), il relè si rilascia e l'avvolgimento ausiliario si sconnette. Questa soluzione tecnica è meno costosa di quella precedente perché permette di usare condensatori elettrolitici più economici di quelli a carta.

Figg. 7.31a, b
Schema di inserzione del condensatore di avviamento:
a. schema di principio;
b. curva corrente-numero di giri e curva-coppia-numero di giri.



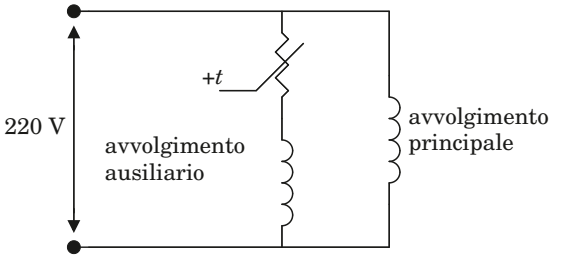
7.31a



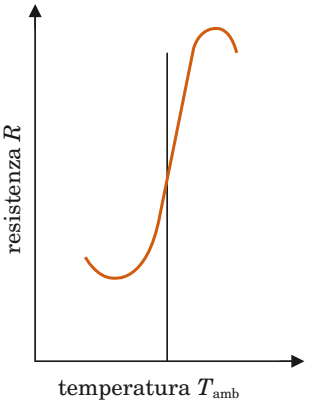
7.31b

Il circuito di sconnessione dell'avvolgimento secondario può essere sostituito da un dispositivo allo stato solido: il termistore PTC (▸ ***Figg. 7.32a, b***), che nella fase di avviamento presenta un basso valore resistivo per cui l'avvolgimento ausiliario è inserito. Il PTC è attraversato da una corrente che genera, per effetto Joule, una quantità di calore superiore a quel-

Figg. 7.32a, b
Avviamento con disinserzione automatica dell'avvolgimento di avviamento ausiliario tramite termistore PTC:
a. schema di principio;
b. curva caratteristica di un termistore PTC.



7.32a



7.32b

la che il componente stesso, per la sua geometria, può dissipare verso l'esterno; ne deriva un incremento di temperatura che aumenta il valore della sua resistenza, provocando un ulteriore aumento della quantità di calore prodotta. Quando il PTC raggiunge il punto anomalo, a ogni ulteriore incremento della temperatura si hanno incrementi della resistenza tali da limitare la corrente a valori molto bassi, il che provoca la stabilizzazione del componente a una temperatura contenuta nella stretta fascia del punto anomalo. In queste condizioni l'avvolgimento ausiliario crea un campo magnetico ausiliario trascurabile ed è praticamente escluso. Una scelta accurata del PTC permette di ottenere l'esclusione dell'avvolgimento ausiliario dopo un tempo sufficiente per ottenere l'esaurimento del transitorio dovuto al picco di corrente di spunto.

Quando il motore funziona a vuoto la velocità di rotazione è prossima a quella sincrona, applicando un carico, la velocità di rotazione diminuisce. La differenza fra velocità sincrona e velocità di rotazione è detta **scorrimento** e viene espressa come valore relativo rispetto alla velocità sincrona in percentuale. Lo scorrimento presenta sempre valori molto piccoli: alla potenza nominale va dal 2 al 6%.

Un motore elettrico asincrono è caratterizzato dai seguenti parametri:
— potenza nominale, che è la potenza meccanica disponibile in modo continuativo sull'albero del motore;
— tensione nominale e suo campo di variazione;
— frequenza nominale;
— velocità di rotazione in sincronismo;
— rapporto coppia massima/coppia nominale;
— rapporto coppia di avviamento/coppia nominale;
— tipo di avviamento (stella-triangolo, inserzione diretta, reostatico).

I motori a induzione monofase sono utilizzati sia nelle applicazioni civili come gli elettrodomestici (lavatrici) sia in quelle industriali.

Motori sincroni

I motori sincroni sono a corrente alternata e ruotano a una velocità costante detta **velocità di sincronismo**; tale velocità n dipende dalla frequenza f della tensione di alimentazione e dal numero di poli del motore p:

$$n = \frac{60}{p} f \qquad 7.4$$

Quando viene sottoposto a brusche variazioni di carico, o a un tipo di carico che richiede una coppia che varia periodicamente nel tempo, il rotore di un motore sincrono può ruotare a una velocità che oscilla intorno a quella sincrona. Questo inconveniente si elimina con avvolgimenti smorzatori.

Il motore elettrico sincrono è caratterizzato dai seguenti parametri:
— velocità di rotazione, espressa in giri al minuto;
— potenza nominale;
— tensione nominale, ossia tensione che occorre fornire per far funzionare il motore alla potenza nominale;
— corrente nominale;
— frequenza nominale;
— sistema di eccitazione.

Il motore sincrono è utilizzato nelle applicazioni che non presentano variazioni di carico e per le quali è richiesta una velocità di rotazione uniforme, come i temporizzatori o gli orologi.

Motori monofase a collettore

Il motore monofase a collettore è costituito da un induttore, a poli salienti come nei motori in corrente continua oppure a traferro costante, sul quale viene realizzato un avvolgimento monofase.

L'indotto è uguale a quello dei motori in corrente continua e possiede un collettore che striscia su due spazzole chiuse in cortocircuito e poste a 180° elettrici. La regolazione della coppia motrice e della velocità viene effettuata ruotando le spazzole di un angolo geometrico compreso fra 0° e 90°. Se l'angolo geometrico varia fra 90° e 180° si ottiene l'inversione del senso di rotazione.

La sua caratteristica meccanica è analoga a quella di un motore in corrente continua con eccitazione serie (◗ Fig. 7.6), per cui presenta una buona coppia di spunto. Viene utilizzato nelle macchine operatrici che funzionano per brevi periodi di tempo, quali saracinesche o piccoli montacarichi.

Regolazione dei motori in corrente alternata

Questi motori offrono minori possibilità di regolazione della velocità rispetto a quelli in corrente continua.

I motori sincroni hanno una velocità fissa e invariabile, mentre quelli asincroni possono essere regolati modificando la frequenza della tensione di alimentazione con circuiti di regolazione che impiegano diodi controllati (◗ ***Mod. B, Cap. 3***).

4 MOTORI UNIVERSALI E MOTORI LINEARI

Motori universali

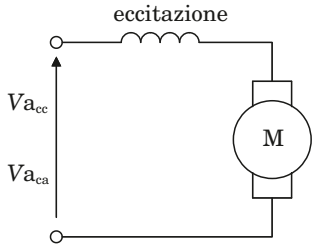


Fig. 7.33
Motore universale.

I motori universali possono funzionare indifferentemente sia a corrente continua sia a corrente alternata e dal punto di vista costruttivo sono uguali ai motori in corrente continua ad eccitazione in serie (◗ ***Fig. 7.33***).

In questo tipo di motori il campo magnetico induttore viene prodotto dall'avvolgimento statorico collegato in serie a quello del rotore. Il motore può funzionare in corrente alternata grazie al collegamento serie degli avvolgimenti di statore e di rotore, perché in corrispondenza con la periodica inversione del verso di percorrenza della corrente si verifica la contemporanea inversione della direzione del campo induttore: pertanto, la coppia motrice possiede sempre lo stesso verso, e quindi il motore può ruotare in una sola direzione.

Per ridurre le perdite dovute alle correnti parassite il circuito magnetico, come nei motori in corrente alternata, è realizzato con lamierini magnetici fra loro isolati.

La ***figura 7.34*** mostra una famiglia di curve caratteristiche coppia-velocità del motore tracciate per differenti valori di tensione di alimentazione. Ogni curva evidenzia l'elevato valore della coppia motrice allo spunto (circa 10 volte superiore a quella di normale funzionamento) e mette in luce che variando il valore della tensione di alimentazione è pos-

sibile regolare la velocità di rotazione del motore mantenendo la coppia motrice costante. La regolazione della velocità dei motori universali alimentati in corrente alternata viene effettuata operando sul valore medio delle tensioni in ogni singola semionda con il sistema a parzializzazione di fase.

I motori universali, presentano bassi costi di fabbricazione e possono essere prodotti in grande serie. Sono utilizzati nei piccoli elettrodomestici (macinacaffè, asciugacapelli) e nella piccole macchine utensili (trapani, levigatrici, piallatrici a mano); sono rumorosi ed emettono radiodisturbi dovuti al sistema spazzole-commutatore.

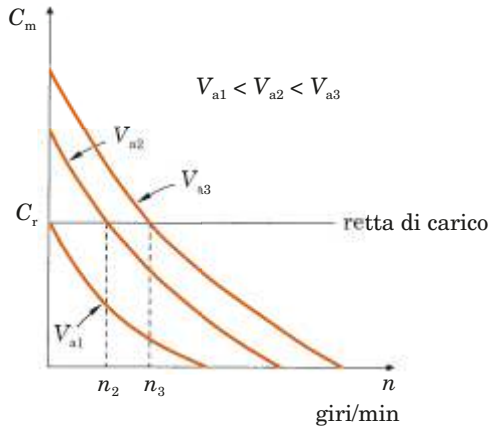


Fig. 7.34
Curva coppia-numero di giri per un motore universale.

Fig. 7.35
Motore lineare.

Motori lineari

I motori lineari sono costituiti da una struttura rettilinea fissa su cui scorre una slitta mobile per cui il movimento prodotto dal motore è una traslazione e non una rotazione. Il tipo più diffuso funziona in corrente continua, ma vengono realizzati motori di tipo asincrono in corrente alternata (▸ ***Fig. 7.35***).

Dal punto di vista costruttivo i magneti permanenti e le bobine di eccitazione possono essere alloggiati, rispettivamente, o nella slitta o nella struttura fissa.

5 MOTORI PASSO-PASSO

Un motore passo-passo (*stepper motor*) è un dispositivo elettromeccanico che trasforma un segnale elettrico in un movimento meccanico angolare discreto. La rotazione dell'albero motore non è continua, ma avviene solo per spostamenti angolari finiti.

Questo motore è costruito in modo tale che a ogni impulso applicato al circuito statorico, il rotore, che è un magnete permanente, ruota di una frazione d'arco; questo angolo è detto **passo angolare**. Dopo avere ruotato, il rotore si ferma e presenta una coppia di mantenimento elevata. La rotazione è funzione del numero di impulsi, mentre il senso di rotazione dipende dall'ordine con cui gli impulsi sono applicati.

I motori passo-passo permettono di controllare la rotazione compiuta dall'albero motore senza richiedere, come avviene per i motori in corrente continua, un sistema di controllo ad anello chiuso; sono anche molto

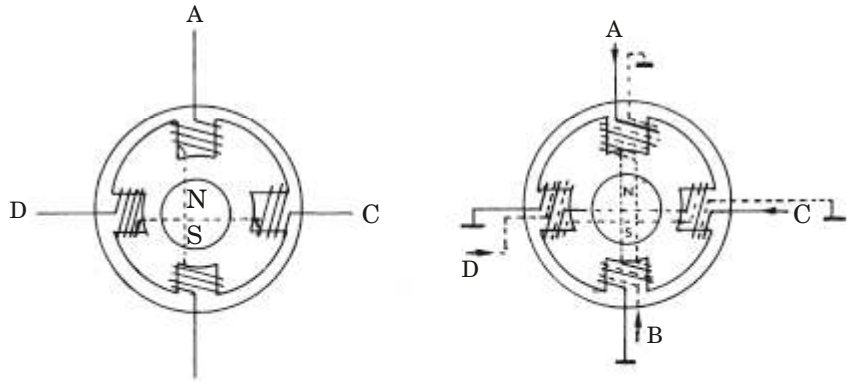
robusti e affidabili perché non presentano parti soggette a usura come le spazzole; rispetto ai motori in corrente continua richiedono circuiti di comando più complessi e il rapporto potenza/volume è maggiore.

Possono essere classificati in tre categorie:

1. motori passo-passo a magnete permanente (PM), bipolari e unipolari;
2. motori passo-passo a riluttanza variabile (VR);
3. motori passo-passo ibridi (HY).

PM
– Permanent magnet
VR
– Variable reluctance
HY
– Hybrid

I **motori passo-passo a magnete permanente bipolari** (▸ ***Fig. 7.36a***) sono formati da un rotore a magnete permanente circondato dalle espansioni polari dello statore che sostengono gli avvolgimenti di eccitazione.



7.36a **7.36b**

Figg. 7.36a, b
Modello di motore passo-passo a magnete permanente:
a. bipolare;
b. unipolare.

Questo motore può essere eccitato in tre modi (▸ ***Figg. 7.37a, b, c***):

- **a fase singola** (*one phase-on*); gli avvolgimenti vengono alimentati secondo la sequenza a quattro passi AB/CD/BA/DC; il rotore ruota a ogni passo di 90° e l'intera sequenza corrisponde a un giro completo del rotore;

- **a due fasi** (*two phases-on*); gli avvolgimenti sono alimentati contemporaneamente secondo la sequenza a quattro passi AB-CD/CD-BA/BA-DC/DC-AB e il rotore, così alimentato, si allinea fra le due espansioni polari; questo modo di eccitazione, che genera una coppia motrice più elevata portando il rotore a ruotare a ogni passo di 90°, è il più utilizzato nelle applicazioni pratiche;

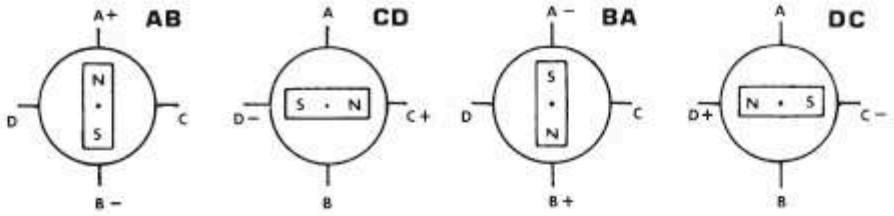
- **a mezzo passo** (*half-step*); l'alimentazione riguarda prima una fase poi entrambe, successivamente solo la seconda ecc.; il passo di rotazione, a ogni cambiamento di fase, è di 45°, e la sequenza di comando è a otto passi AB/AB-CD/CD/CD-BA/BA/BA-DC/DC/DC-AB/.

Se le sequenze mostrate per i tre modi di pilotaggio sono applicate in senso inverso, il rotore ruota nel senso opposto.

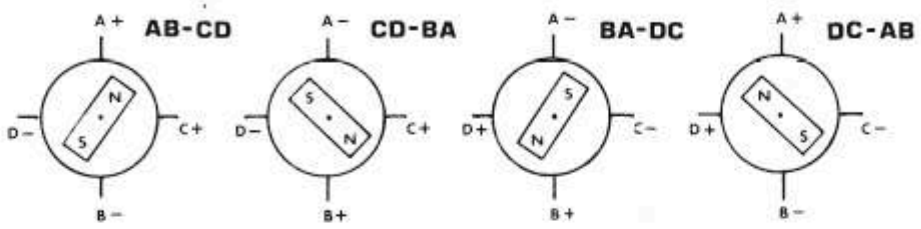
Il motore utilizzato per descrivere il motore passo-passo bipolare è chiaramente un modello teorico, in quanto gli angoli di rotazione di 90° o di 45° non sono impiegabili in nessun tipo di realizzazione pratica.

Gli angoli di rotazione dei motori reali sono tipicamente compresi fra 0,9° e 1,8°.

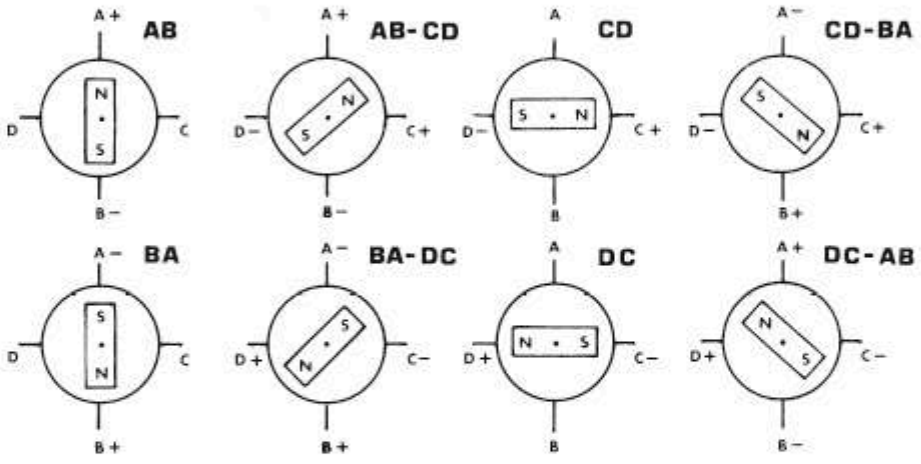
Figg. 7.37a, b, c
Metodo di eccitazione della bobina di un motore passo-passo bipolare a magnete permanente per ottenere una rotazione oraria:
a. a una fase;
b. a due fasi;
c. a mezzo passo.



7.37a



7.37b



7.37c

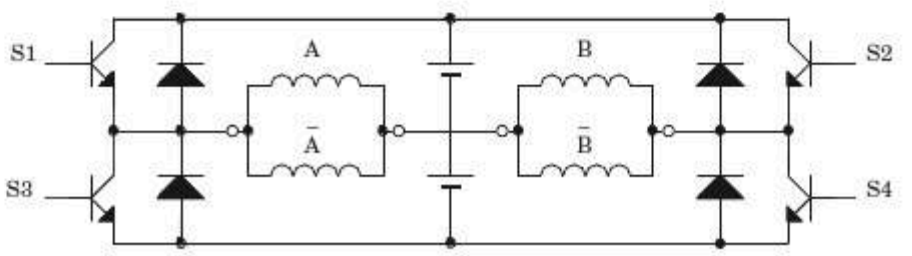
PASSO	S1	S2	S3	S4
1	ON	ON	OFF	OFF
2	OFF	ON	ON	OFF
3	OFF	OFF	ON	ON
4	ON	OFF	OFF	ON
1	ON	ON	OFF	OFF

Il motore passo-passo bipolare richiede un circuito di comando che possa invertire il senso della corrente negli avvolgimenti. Una configurazione circuitale che permette di pilotare gli avvolgimenti correttamente è quella che utilizza il collegamento dei transistor di uscita a ponte.

La ***figura 7.38*** mostra una tipica configurazione di comando per **motori bipolari a ponte**.

La sequenza di comando per ottenere un funzionamento a una fase a quattro passi è rappresentata nella tabella a sinistra.

Fig. 7.38
Circuito di comando per un motore passo-passo bipolare.



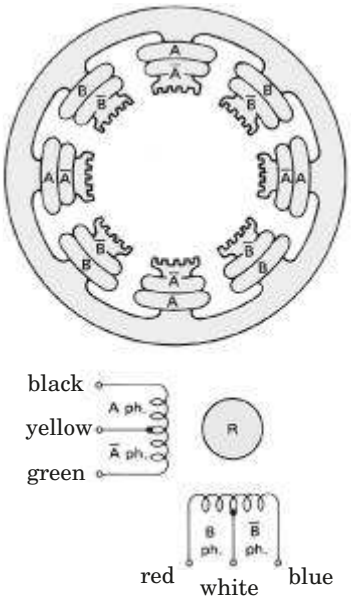


Fig. 7.39
Connessione interna degli avvolgimenti di un motore passo-passo a magnete permanente unipolare a sei terminali.

PASSO	s1	s2	s3	s4
1	ON	OFF	ON	OFF
2	ON	OFF	OFF	ON
3	OFF	ON	OFF	ON
4	OFF	ON	ON	OFF
1	ON	OFF	ON	OFF

Fig. 7.40
Circuito di comando per un motore passo-passo unipolare.

I **motori passo-passo a magnete permanente unipolari** (▸ ***Figg. 7.36b*** e ***7.39***) funzionano con le stesse sequenze usate per comandare il tipo bipolare, ma mentre in quest'ultimo l'inversione del flusso magnetico nello statore è ottenuta invertendo il senso della corrente che circola nella bobina, nel tipo unipolare l'inversione del flusso è ottenuta alimentando alternativamente due avvolgimenti separati, avvolti insieme sulla stessa espansione polare statorica.

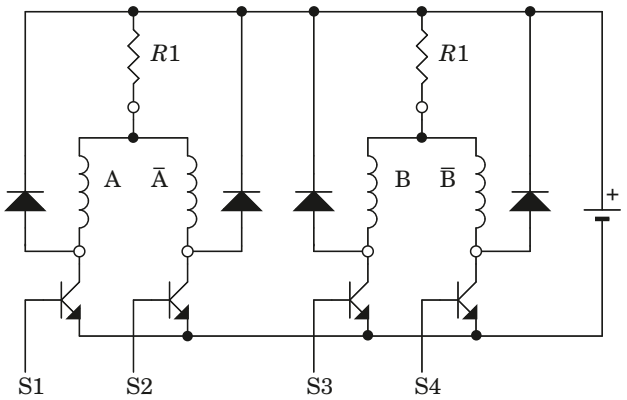
I motori unipolari possono essere comandati con configurazioni a collettore aperto (▸ ***Fig. 7.40***). La sequenza di comando per ottenere un funzionamento a una fase a quattro passi è illustrata nella tabella in basso a sinistra.

I motori passo-passo unipolari e bipolari presentano caratteristiche elettriche e meccaniche simili. Poiché, però, non richiedono un doppio avvolgimento per ciascuna espansione polare, quelli bipolari possono essere realizzati utilizzando un filo di sezione maggiore e quindi, a parità di volume, possono sviluppare una maggiore potenza rispetto agli omologhi unipolari.

La maggiore complessità del circuito di pilotaggio non rappresenta più, come avveniva in passato, uno svantaggio perché attualmente i circuiti di pilotaggio sono realizzati in forma integrata.

Nei **motori passo-passo a riluttanza variabile** il rotore, realizzato in ferro dolce non magnetizzato, possiede un numero di espansioni polari inferiore a quello dello statore. Quando le due espansioni polari dello statore vengono eccitate, il rotore ruota per allineare la coppia dei suoi poli con quelli statorici attivi; attivando, secondo un'opportuna sequenza, gli avvolgimenti statorici, è possibile controllare la rotazione del rotore.

Le sequenze di eccitazione sono le stesse descritte per i motori passo-passo a magnete permanente. L'angolo di rotazione, ottenibile con il modello proposto nella ***figura 7.41***, è di 15°. Utilizzando più poli è possibile ottenere angoli di rotazione più piccoli. Questo tipo di motore è in grado di raggiungere velocità elevate e di fornire una coppia motrice limitata, ma è piuttosto costoso.



I **motori passo-passo ibridi** sono analoghi, dal punto di vista costruttivo, a quelli a riluttanza variabile, dai quali differiscono per il fatto che il rotore è costituito da un magnete permanente con denti in ferro dolce.

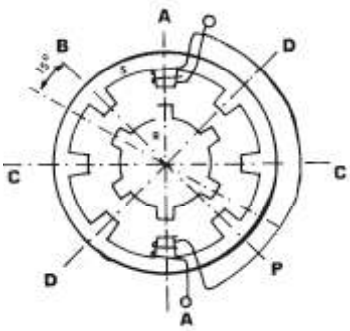


Fig. 7.41
Modello di un motore passo-passo a riluttanza variabile.

S statore
R rotore

Sono caratterizzati da coppia e velocità elevate, piccoli angoli di rotazione, bassa inerzia e notevole precisione angolare.

Le sequenze di comando per i motori passo-passo possono essere generate utilizzando configurazioni circuitali con componenti discreti, resistenze, transistor, amplificatori operazionali, oppure con microcircuiti dedicati (SAA1027, L297, TL376, TCA1560, TCA1561).

Questi circuiti integrati contengono tutti gli elementi di controllo che possono generare, con le temporizzazioni corrette, una delle sequenze di comando degli avvolgimenti statorici descritte in precedenza. Qualche circuito contiene, oltre alla sezione di controllo, anche quella di potenza, che provvede alla generazione della corrente necessaria per pilotare gli avvolgimenti dello statore.

Caratteristiche elettriche e meccaniche del motore passo-passo

I parametri caratteristici di un motore passo-passo in corrente continua sono:

— passo angolare (*step angle*) e numero di passi per giro (*step for revolution*);
— coppia di tenuta (*holding torque*);
— coppia residua (*residual torque*);
— campo di risposta (*response range*);
— sequenza di comando degli avvolgimenti;
— durata minima dell'impulso che permette la rotazione.

Il **passo angolare** α rappresenta l'angolo di rotazione compiuto a ogni commutazione delle fasi dall'albero del motore; i valori più comuni sono 1,8°, 3,75°, 7,5°, 9°, 15°, a cui corrispondono i seguenti numeri di passi per giro: 200, 96, 48, 40, 25.

Il passo angolare è dato da:

$$\alpha = \frac{360°}{N_P} \qquad 7.5$$

dove:

N_P è il numero di passi per giro

Per valutare le caratteristiche meccaniche del carico che si può collegare all'albero del motore occorre analizzare i valori della **coppia di tenuta** e della **coppia residua**, che rappresentano, rispettivamente, i valori massimi di coppia applicabili all'albero motore a motore fermo ma alimentato, e a motore spento.

Il **campo di risposta** rappresenta il campo di frequenza entro cui un motore passo-passo può operare (partire, fermarsi, invertire il senso di marcia ecc.) senza perdere passi. Durante la rotazione, dopo ogni passo, il rotore è sottoposto a un'oscillazione intorno alla posizione finale, la cui entità è valutata con un parametro specifico detto **overshoot** (sovraoscillazione). Quando il motore opera in bassa frequenza, un valore eccessivo della sovraoscillazione provoca un'usura eccessiva dei giunti di trasmissione meccanici che accoppiano l'albero del motore con il carico esterno.

Per individuare la gamma di frequenze in cui fare operare correttamente il motore occorre analizzare la curva caratteristica coppia motrice-frequenza degli impulsi di comando (▸ ***Fig. 7.42***). Stabilito il valore della **coppia resistente**, il motore si può avviare soltanto se la sequenza di comando viene applicata a una frequenza di impulsi opportuna.

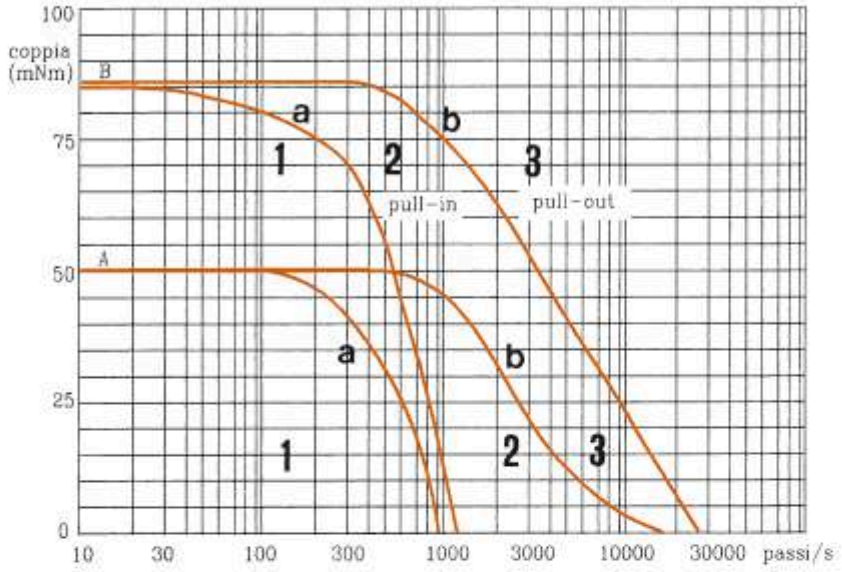


Fig. 7.42
Caratteristica coppia motrice-frequenza.

a. motore passo-passo unipolare;
b. motore passo-passo bipolare.

Nella figura 7.42, la curva *a* rappresenta, per ogni valore della coppia, il valore di frequenza degli impulsi limite oltre al quale non si può ottenere l'avviamento del motore; la curva *b* fornisce il valore limite della frequenza degli impulsi oltre il quale il motore perde il passo e si ferma. La zona **1**, delimitata dagli assi e dalla curva *a*, indica il campo di frequenze in cui il motore funziona in modo regolare e completo. La zona **2**, detta **slew-range**, compresa fra le curve *a* e *b*, delimita il campo di frequenze in cui il motore può solo continuare a girare nello stesso verso (può variare la velocità se tale variazione non è brusca), non può avviarsi o fermarsi né invertire il senso della rotazione. La zona **3**, a destra della curva *b*, rappresenta una situazione di blocco: il motore non può né avviarsi, se fermo, né invertire il senso della rotazione se in movimento.

La ***figura 7.43a*** mostra lo spaccato di un motore passo-passo a magnete permanente.

7.43a

7.43b

Fig. 7.43
Motore passo-passo a magnete permanente (*fonte*: Superior Electric):
a. spaccato del motore;
b. esploso del motore.

La ***figura 7.44*** presenta un estratto dal foglio tecnico di un motore passo-passo in cui vengono evidenziati i valori tipici assunti dalle variabili più significative.

Fig. 7.44
Caratteristiche elettriche e meccaniche di un motore passo-passo
(*fonte*: catalogo RS).

RIDUTTORE	ANGOLO DI PASSO IN USCITA	RIDUTTORE	ANGOLO DI PASSO IN USCITA
332-868	1,8°	336-422	0,06°
336-450	0,6°	336-416	0,03°
336-444	0,3°	336-400	0,03°
336-438	0,15°		

Nota Il gioco tipico di un riduttore è di 2°; occorre tenerne conto quando la precisione di posizionamento è un fattore critico.

SPECIFICHE TECNICHE

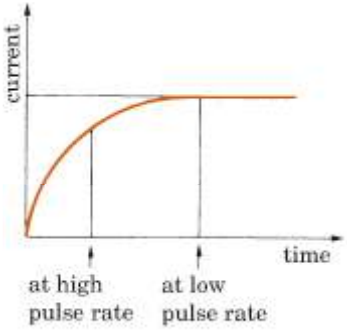
	Misura 1	Misura 2		Misura 1	Misura 2
Angolo di passo	7,5°	7,5°	Induttanza per fase (bobina) a 200 passi/sec	160 mH/fase	400 mH/fase
Tolleranza angolo di passo	± 40□	± 20□	Alimentazione bobina	100 mA	240 mA
Coppia di lavoro, max	6 mN m	57 mN m	Campo temperatura ambiente	da –20 °C a +70 °C	
Coppia di mantenimento	10 mN m	85 mN m	Temperatura max motore	120 °C	120 °C
Valore di pull-in*	350 passi/sec	130 passi/sec	Inerzia rotore max	2,6 g cm^2	45 g cm^2
Resistenza per fase (bobina) a 20 °C	120 □ r/fase	47 □ r/fase	Tensione nominale	12 V =	12 V =
			Potenza assorbita	2 W	5,3 W

* Il valore max di pull-in è la velocità max alla quale il motore può girare in assenza di carico senza perdere passi.

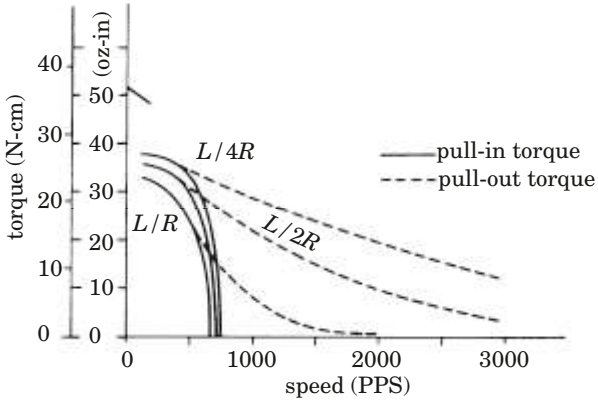
Alimentazione del motore passo-passo

Quando si eccita un motore passo-passo con impulsi a tensione costante, la coppia sviluppata diminuisce col crescere della velocità di passo perché aumenta la forza controelettromotrice e perché il tempo di salita della corrente nell'avvolgimento limita la potenza erogata al motore (▸ ***Figg. 7.45a, b***).

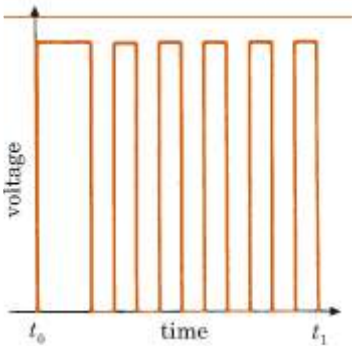
Figg. 7.45a, b:
a. diagramma dell'andamento della corrente in un motore passo-passo;
b. diagramma delle curve coppia-velocità in funzione della variazione della costante di tempo L/nR (*fonte*: Vexta).



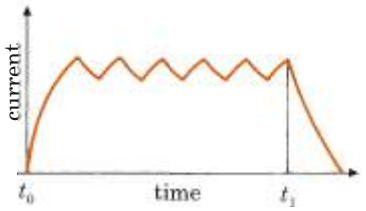
7.45a



7.45b



7.46a



7.46b

Figg. 7.46a, b
Diagramma della relazione fra tensione e corrente di un comando a chopper:
a. tensione di comando;
b. andamento della corrente nel tempo.

Poiché la costante di tempo ($\tau = L/R$) è data dal rapporto fra il valore dell'induttanza e la resistenza dell'avvolgimento, per ridurre il tempo di salita si può inserire in serie all'avvolgimento una resistenza; a volte ciò comporta però l'inconveniente di far aumentare il consumo in modo inaccettabile. Un metodo alternativo consiste nell'aumentare la tensione di alimentazione in modo proporzionale alla velocità, utilizzando un **pilotaggio a chopper** (▸ ***Figg. 7.46a, b***), che permette di mantenere costante la corrente media circolante negli avvolgimenti perché si può applicare all'avvolgimento (in modo on-off) un valore di tensione di alimentazione anche dieci volte superiore a quello applicabile con continuità.

La massima velocità di un motore passo-passo è quindi limitata dall'induttanza degli avvolgimenti e dalle correnti parassite.

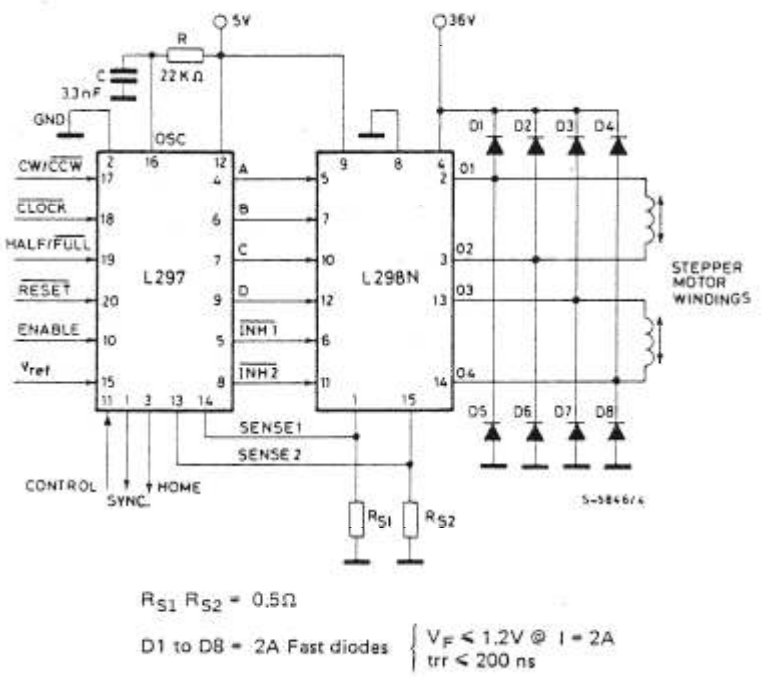
Applicazioni del motore passo-passo

Il motore passo-passo è utilizzato soprattutto nelle applicazioni in cui il comando è fornito sotto forma digitale. I motori passo-passo sono utilizzati come attuatori nella periferiche asservite agli elaboratori (unità a dischi, stampanti, plotter), nell'azionamento dei robot e delle macchine utensili a CN, nel posizionamento di piattaforme ecc.

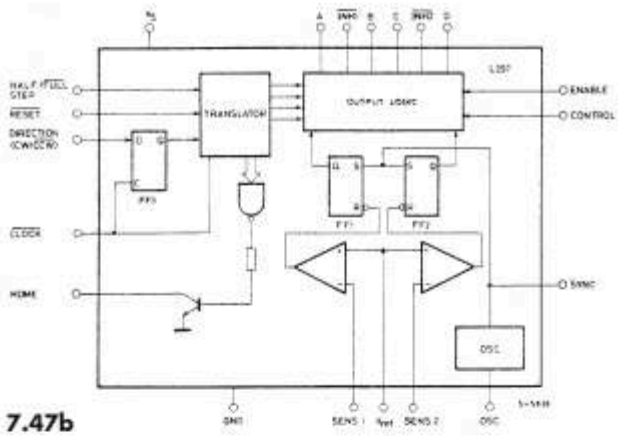
Le ***figure 7.47a***, ***b***, ***c*** mostrano lo schema funzionale di base per il pilotaggio di un motore passo-passo a magnete permanente bipolare che impiega due circuiti integrati monolitici, un controllore che genera la sequenza corretta di controllo delle fasi del motore (il dispositivo L297) e un ponte di potenza (L298) che pilota correttamente gli avvolgimenti del motore.

Il microcircuito L297 è in grado di selezionare il tipo di funzionamento (a mezzo passo o a passo intero; ingresso HALF/FULL), di invertire il senso di rotazione (ingresso CW/CCW) e di controllare la velocità di rotazione per mezzo del segnale di clock. La funzione degli altri ingressi di controllo può essere approfondita consultando il foglio tecnico del componente (▸ ***CD-ROM***).

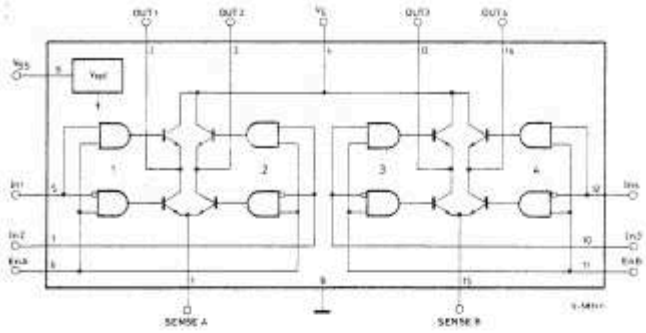
Figg. 7.47a, b, c
Motore passo-passo a magnete permanente bipolare:
a. schema funzionale di base per il pilotaggio;
b. schema a blocchi del microcircuito L297;
c. schema a blocchi del microcircuito L298N.



7.47a



7.47b



7.47c

PER FISSARE I CONCETTI

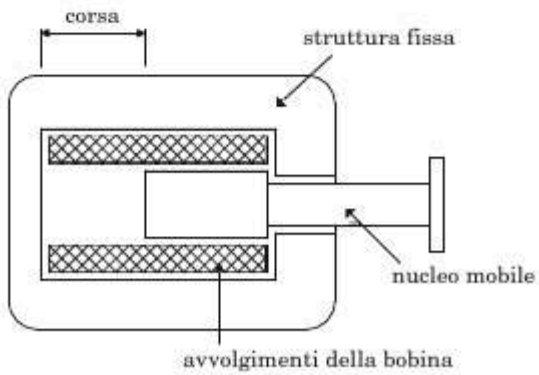
1. Descrivi le caratteristiche principali dei motori a induzione.
2. Descrivi le caratteristiche elettriche e meccaniche del motore passo-passo.
3. Qual è la sequenza di eccitazione di un motore passo-passo a magnete permanente bipolare a fase singola?
4. Qual è la differenza fra un motore passo-passo bipolare e uno unipolare?
5. Quali sono i campi di applicazione tipici di un motore passo-passo?

6 ELETTROMAGNETI

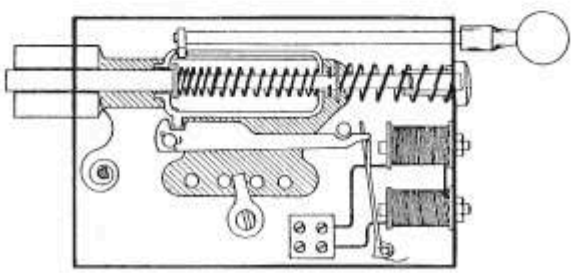
Gli elettromagneti, come i motori, trasformano un segnale elettrico in un movimento e sono attuatori molto diffusi nelle applicazioni industriali.

La ***figura 7.48a*** mostra lo schema di un'elettroserratura costituita da un materiale magnetico (armatura) che contiene al suo interno una bobina, e da un nucleo mobile che in condizione di riposo viene mantenuto da una molla in posizione tale da sporgere dall'armatura. Quando la bobina è percorsa da corrente elettrica, si crea un campo magnetico che genera una forza in grado di attirare il nucleo verso l'interno, comprimendo la molla e azionando il meccanismo collegato. La ***figura 7.48b*** mostra la struttura completa di un'elettroserratura commerciale.

Figg. 7.48a, b
Elettroserratura:
a. schema;
b. struttura interna.



7.48a



7.48b

La ***figura 7.49*** mostra lo schema di una testina stampante ad aghi. Il solenoide è del tipo a **minima riluttanza**; il nucleo a riposo è mantenuto all'interno dell'armatura da una molla di richiamo, ma quando la bobina viene eccitata, il flusso sposta il nucleo nella posizione di minima riluttanza facendolo fuoriuscire dall'armatura.

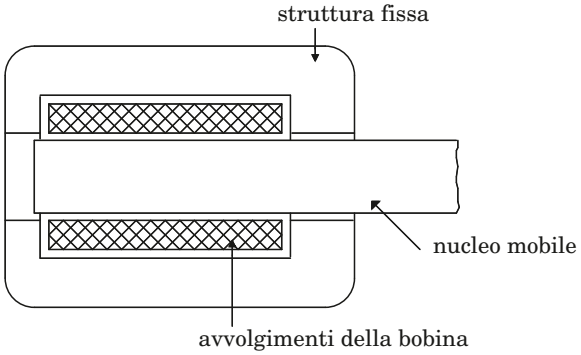


Fig. 7.49
Solenoide a minima riluttanza.

I solenoidi possono essere alimentati sia in corrente continua sia in corrente alternata. Nel funzionamento in alternata la corrente è massima quando il nucleo sporge dall'armatura e diminuisce fino a un valore minimo, detto **di mantenimento**, quando il nucleo si trova all'interno dell'armatura. La diminuzione della corrente che scorre nella bobina è causata dalla diminuzione della reattanza induttiva ($X_L = w \cdot L$) di quest'ultima, provocata dalla presenza del nucleo all'interno dell'armatura; nel funzionamento in corrente continua, dopo un transitorio provocato dalla variazione dell'induttanza dovuta allo spostamento del nucleo, la corrente raggiunge un valore massimo di mantenimento limitato dalla sola resistenza della bobina.

Gli elettromagneti sono utilizzati nella realizzazione delle elettrovalvole e delle serrature elettriche, nonché nel comando degli aghi delle stampanti oppure dei martelletti delle macchine per scrivere.

7 ATTUATORI ACUSTICI

Gli attuatori acustici sono dispositivi elettronici che effettuano la conversione di un segnale elettrico in una vibrazione sonora; sono utilizzati nei circuiti di amplificazione di tutte le apparecchiature elettroniche che trattano segnali nel campo audio (20 ÷ 20 000 Hz). Nel secondo, particolare campo di applicazione, l'attuatore deve effettuare la conversione del segnale elettrico nel modo più fedele possibile.

Gli attuatori acustici più diffusi sono gli altoparlanti, mentre i trasduttori acustici più usati sono i microfoni.

Fig. 7.50
Forma costruttiva dei microfoni (*fonte*: RS).

Microfoni

I **microfoni** convertono le vibrazioni dell'aria provocate da suoni e rumori, in una grandezza elettrica. Sono suddivisi, in base alla tecnica costruttiva, in microfoni a bobina mobile, elettrostatici, a nastro, piezoelettrici e a carbone (▸ ***Fig. 7.50***).

— Nel **microfono a bobina mobile** le vibrazioni dell'aria muovono una membrana solidale con una bobina posta all'interno di un magne-

te; tale movimento taglia le linee di forza del campo magnetico generando una fem indotta.

— Nei **microfoni elettrostatici** la membrana mobile costituisce l'armatura di un condensatore; la trasduzione è determinata dalla variazione di capacità.
— La trasduzione nei **microfoni a nastro** avviene grazie al movimento, indotto dalla vibrazione dell'aria, di un nastro immerso in un campo magnetico.
— Il **microfono piezoelettrico** sfrutta la proprietà dei materiali piezoelettrici di generare una differenza di potenziale quando sono sottoposti a una pressione.
— I **microfoni a carbone** sono costituiti da una capsula piena di granuli di carbone chiusa da una membrana. La vibrazione dell'aria causata dai suoni esercita una pressione che, attraverso il movimento della membrana, si propaga ai granuli di carbone comprimendoli, e quindi riducendone la resistenza elettrica. Questo tipo di microfono presenta un rumore di fondo dovuto alla corrente continua che circola nel circuito di misura.

I principali parametri che caratterizzano questi dispositivi sono:
— campo di frequenza di riproduzione fedele del segnale (di solito da 50 Hz a 16 kHz);
— impedenza di ingresso (i valori tipici sono 150, 170, 200, 600, 50 kΩ);
— sensibilità, espressa in dB e misurata a 1 kHz (valore di riferimento 0 dB pari a 1 V/μbar);
— direzionalità, misura della sensibilità del microfono al segnale sonoro in funzione della sua direzione di provenienza, valutata mediante diagrammi polari.

Altoparlanti

L'altro attuatore elettroacustico molto comune è l'**altoparlante**. Il tipo di altoparlante più diffuso è il magnetodinamico, nel quale il suono viene prodotto dalle molecole dell'aria messe in movimento da una membrana, a sua volta posta in vibrazione dalla bobina contenuta nell'altoparlante. L'intensità della vibrazione della bobina, e quindi la potenza sonora emessa, dipende dalla potenza del segnale elettrico applicato.

I principali parametri che caratterizzano questi dispositivi sono:
— campo di frequenza di riproduzione fedele del segnale;
— impedenza di ingresso (i valori tipici sono 4, 8, 16, 32, 100 Ω);
— potenza nominale in watt, che rappresenta la potenza massima dissipabile con continuità (0,1 ÷ 60 W);
— campo di variazione della tensione applicabile;
— tempo di vita espresso in ore;
— rendimento, dato dal rapporto fra potenza acustica irradiata e potenza elettrica assorbita dall'altoparlante;
— direttività, che rappresenta l'intensità sonora dell'altoparlante nelle due direzioni (di fronte e dietro); è definita attraverso diagrammi polari.

Fig. 7.51
Forma costruttiva degli altoparlanti (*fonte*: RS).

La forma e le dimensioni degli altoparlanti (▸ ***Fig. 7.51***) dipendono dai valori di frequenza che possono essere riprodotti, dalla potenza applicabile e dai materiali utilizzati nella fabbricazione. Esistono realizzazioni per il montaggio su pannello e su scheda a circuito stampato.

Un altro tipo di attuatore acustico è il **cicalino** o **buzzer** (▸ ***Fig. 7.52***). Questo componente, che genera una nota di frequenza fissa e di intensità proporzionale alla tensione di alimentazione, è utilizzato nei registratori di cassa, nei sistemi di allarme, nel settore automobilistico.

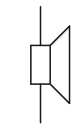
Simbolo grafico e identificazione

La ***figura 7.53*** mostra i simboli grafici degli attuatori acustici. La sigla di identificazione dell'altoparlante è LS.

Fig. 7.52
Forma costruttiva del buzzer (*fonte*: RS).

7.52

Fig. 7.53
Simboli grafici dei trasduttori acustici.

SIMBOLO	DESCRIZIONE
	altoparlante
	suoneria
	cicala, ronzatore
	sirena

7.53

PER FISSARE I CONCETTI

1. Che cos'è un elettromagnete?
2. Quali sono le caratteristiche di un microfono?
3. Che cos'è un altoparlante? Quali sono i principali parametri che ne descrivono il comportamento?

SINTESI DEL MODULO D

CAPITOLO 4

Gli **attuatori** sono dispositivi che permettono di effettuare conversioni di energia elettromeccanica. Le caratteristiche meccaniche dell'uscita del dispositivo dipendono dal segnale elettrico fornito in ingresso. Nelle applicazioni elettroniche vengono impiegati come attuatori: i **motori in corrente continua** e **alternata**, **passo-passo**, gli **attuatori acustici**, gli **elettromagneti**, i **relè**.

— Il **motore elettrico** è una macchina elettrica rotante che trasforma l'energia elettrica in meccanica; è costituito da una parte fissa, detta **statore**, e da una parte mobile, detta **rotore**, che può ruotare attorno a un asse. Le forze elettromagnetiche che lo statore esercita sul rotore creano una coppia motrice che agisce in un piano normale all'asse di rotazione. Tale coppia fa ruotare l'asse e, con esso, il carico meccanico che vi è collegato.

Il **motore in corrente continua** è costituito da due parti, una fissa (statore) e una mobile (rotore), e da un commutatore elettromeccanico costituito da un collettore a segmenti fra di loro isolati e da una coppia di spazzole. L'asse del rotore si prolunga in un albero che fuoriesce dal corpo del motore permettendo la connessione dell'oggetto posto in rotazione. La parte fissa della macchina genera il flusso magnetico, mentre la parte mobile, attraverso il controllo della corrente che attraversa le spire che vi sono avvolte, controlla la **coppia motrice** e la **velocità di rotazione**.

— I **motori senza spazzole** funzionano allo stesso modo dei normali motori in corrente continua; in essi, però, il commutatore meccanico a collettore è sostituito da un commutatore elettronico. Sono formati da uno statore che porta tre avvolgimenti organizzati in **tre fasi** (*A*, *B*, *C*) disposte a 120°, un rotore a magnete permanente, un commutatore elettronico.

— L'**inversione del senso di rotazione** in un motore in corrente continua viene ottenuta invertendo la polarità della tensione di alimentazione applicata.

— La **regolazione della velocità** in modo continuo viene effettuata regolando la tensione applicata al motore oppure alimentando il motore con un segnale impulsivo di frequenza adeguata e controllando il **tempo di conduzione** (*duty-cycle*) nel periodo; la tensione di alimentazione non viene applicata al motore con continuità ma solo per brevi periodi di tempo. In questo modo si può variare il valore della corrente di armatura. Un altro modo di regolare la velocità del motore consiste nel variare il tempo di conduzione nel periodo. Questa tecnica di regolazione della velocità del motore è detta a **modulazione di impulsi** (PWM).

Esistono tre tipi di motore in corrente alternata: motori a induzione o asincroni, monofase e polifase; motori sincroni; motori a collettore. Nei **motori a induzione** o **asincroni** lo statore è alimentato direttamente dalla linea, mentre negli avvolgimenti del rotore circola una corrente prodotta per induzione, in quanto i conduttori del rotore intersecano le linee del flusso magnetico generato dallo statore.

— I **motori sincroni** hanno una velocità fissa e invariabile, mentre quelli **asincroni** possono essere regolati modificando la frequenza della tensione di alimentazione con circuiti di regolazione che impiegano diodi controllati.

I **motori universali** possono funzionare indifferentemente sia in corrente continua sia in corrente alternata; dal punto di vista costruttivo sono uguali ai motori in corrente continua a eccitazione in serie.

— I **motori lineari** sono costituiti da una struttura rettilinea fissa su cui scorre una slitta mobile per cui il movimento prodotto dal motore è una traslazione e non una rotazione. Il tipo più diffuso funziona in corrente continua.

Un **motore passo-passo** (*stepper motor*) è un dispositivo elettromeccanico che trasforma un segnale elettrico in un movimento meccanico angolare discreto. La rotazione dell'albero motore non è continua, ma avviene solo per spostamenti angolari finiti. Questo motore è costruito in modo tale che a ogni impulso applicato al circuito statorico il rotore, che è un magnete permanente, ruota di una frazione d'arco. Questo angolo viene detto **passo angolare**.

— I motori passo-passo permettono di controllare la rotazione compiuta dall'albero motore senza richiedere, come avviene per i motori in corrente continua, un sistema di controllo ad anello chiuso. Sono molto robusti e affidabili perché non presentano parti soggette a usura quali le spazzole; rispetto ai motori in corrente continua richiedono circuiti di comando più complessi e il rapporto potenza/volume è maggiore.

— I motori passo-passo possono essere classificati in tre categorie: motori passo-passo **a magnete permanente** (PM), **bipolari** e **unipolari**, motori passo-passo **a riluttanza variabile** (VR), motori passo-passo **ibridi** (HY).

Un'**elettroserratura** è costituita da una struttura di materiale magnetico (**armatura**) che contiene al suo interno una bobina e un nucleo mobile che in condizione di riposo viene mantenuto da una molla in una posizione tale da sporgere dall'armatura. Quando la bobina è percorsa da una corrente elettrica, crea un campo magnetico che genera una forza in grado di attirare il nucleo verso l'interno comprimendo la molla e azionando il meccanismo collegato.

Gli **attuatori acustici** effettuano la conversione di un segnale elettrico in una vibrazione sonora e sono utilizzati nei circuiti di amplificazione di tutte le apparecchiature elettroniche che trattano segnali nel campo audio (20 ÷ 20 000 Hz). Gli attuatori acustici più diffusi sono gli **altoparlanti**, mentre i trasduttori acustici più usati sono i **microfoni**.

— I **microfoni** convertono le vibrazioni dell'aria provocate da suoni e rumori in una grandezza elettrica. Sono suddivisi in base alla tecnica costruttiva in microfoni a bobina mobile, elettrostatici, a nastro, piezoelettrici, a carbone.

— L'**altoparlante** più diffuso è quello **magnetodinamico**, nel quale il suono viene prodotto dalle molecole dell'aria messe in movimento da una membrana, a sua volta posta in vibrazione dalla bobina contenuta nell'altoparlante. L'intensità della vibrazione della bobina, e quindi la potenza sonora emessa, dipende dalla potenza del segnale elettrico applicato.

MODULO D VERIFICHE

1.
Descrivi brevemente come vengono classificati i motori elettrici.

2.
Descrivi il principio di funzionamento di un motore in corrente continua.

3.
Descrivi le caratteristiche elettromeccaniche di un motore in corrente continua.

4.
Disegna e commenta la curva caratteristica elettromeccanica di un motore in corrente continua con eccitazione serie.

5.
Descrivi il principio di funzionamento di un motore brushless. Effettua una comparazione fra le caratteristiche tecniche di un motore in corrente continua e un motore brushless.

6.
Quali sono le principali tecniche di pilotaggio di un motore in corrente continua? È possibile modificare la velocità di rotazione di un motore in corrente continua? Se sì, come?

7.
Quali vantaggi offre la tecnica di regolazione della velocità PWM?

8.
Descrivi il funzionamento di un motore passo-passo a magnete permanente bipolare. In quanti e quali modi è possibile eccitare un motore passo-passo bipolare?

9.
Quali sono le principali caratteristiche elettriche e meccaniche di un motore passo-passo?

10.
Descrivi la caratteristica coppia motrice-frequenza di un motore passo-passo.

11.
Descrivi il principio di funzionamento di un microfono a bobina mobile.

12.
Quali sono i principali parametri che caratterizzano un altoparlante?

MODULO E

Microcircuiti

CAP 8

CAP 9

RISORSE ONLINE

CIRCUITI INTEGRATI MONOLITICI
CIRCUITI MICROLOGICI DIGITALI

Prerequisiti

- Fisica dei semiconduttori.
- Principio di funzionamento della giunzione PN.
- Caratteristiche elettriche delle principali famiglie di micrologici.

Obiettivi

Conoscenze

- Fasi di fabbricazione dei circuiti integrati bipolari e unipolari.
- Analisi del comportamento di un circuito integrato.
- Come affrontare e risolvere i problemi tecnologici dei circuiti integrati.
- Quali dispositivi elettronici possono essere integrati e quali limitazioni pone la tecnologia.
- Tecnologia dei circuiti ibridi.

Competenze

- Saper analizzare un progetto elettronico tenendo conto dei vincoli posti dalla tecnologia di fabbricazione.
- Saper selezionare correttamente i circuiti micrologici in funzione delle loro caratteristiche elettriche.

CAP 8

Concetti chiave

- Fase di ibridizzazione
- Latch-up
- Processo di diffusione
- Resistenza di strato

CIRCUITI INTEGRATI MONOLITICI

1 Componenti micrologici

RISORSE ONLINE

Fasi di fabbricazione dei circuiti integrati
Fabbricazione dei chip con la tecnologia bipolare
Componenti integrabili su chip
Isolamento dielettrico
Fabbricazione dei circuiti integrati MOS
Tecnologie miste: smartpower
Resa di produzione dei circuiti integrati
Circuiti ibridi

Un circuito monolitico integrato è formato da una sottile piastrina di silicio monocristallino nella quale, con processi produttivi mirati, vengono ricavati e interconnessi migliaia di componenti elettronici quali resistenze, transistor, capacità, diodi. Nella letteratura specializzata questi circuiti vengono chiamati **microcircuiti**.

I microcircuiti sono classificati, in base al processo tecnologico utilizzato per produrli, in tre gruppi: circuiti integrati monolitici, microcircuiti a film (sottile e spesso), circuiti ibridi. I microcircuiti a film sono realizzati depositando su uno strato isolante i vari componenti elettronici attivi e passivi. I microcircuiti ibridi sono ottenuti assemblando componenti prodotti con le tecniche proprie dei microcircuiti con normali componenti discreti miniaturizzati. La ricerca nel settore microelettronico modifica e rinnova molto rapidamente i processi di fabbricazione, e di conseguenza i metodi di progetto e le tecniche di realizzazione delle apparecchiature elettroniche vengono continuamente aggiornati.

1 COMPONENTI MICROLOGICI

I circuiti integrati eseguono funzioni e offrono prestazioni ottenibili anche con circuiti realizzati con componenti discreti (resistenze, diodi, transistor), ma il costo complessivo di un circuito realizzato a componenti discreti è decisamente superiore rispetto a quello di un circuito integrato equivalente. Il circuito integrato richiede, infatti, grandi investimenti in fase di sviluppo e di messa a punto, ma una volta che il processo produttivo è stato realizzato, e se il numero di pezzi da produrre è adeguato, il costo del singolo microcircuito (**microchip**) diventa estremamente contenuto.

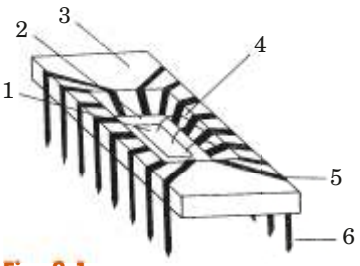


Fig. 8.1
Sezione di un circuito integrato.

1 chip
2 vano
3 contenitore
4 collegamento fra chip e contenitore
5 piste sul contenitore
6 terminale

La ***figura 8.1*** mostra la struttura di un tipico circuito integrato. Il circuito elettronico miniaturizzato, realizzato sul substrato di silicio monocristallino, è alloggiato nella cavità del contenitore e saldato alla base di appoggio. Nella letteratura tecnica il circuito miniaturizzato viene indicato con termini diversi, ma quelli di uso più corrente sono **chip** (gettone, scheggia), **die** (cubetto, dado), **bar** (barretta), **piastrina**.

Le dimensioni di un circuito integrato sono $1{,}25 \times 1{,}25$ mm^2 e $8{,}9 \times 8{,}9$ mm^2 e permettono di alloggiare un numero di componenti che varia da poche decine ad alcune centinaia di migliaia. Il contenitore (**package**) agisce da adattatore dimensionale. Le dimensioni millimetriche del chip e la sua intrinseca fragilità non ne permettono una manipolazione diret-

ta se non per alcune particolari tecniche di produzione (**circuiti ibridi**).

Le applicazioni industriali richiedono ai processi di progettazione e di produzione l'uso di attrezzature e macchine utensili con il minor numero possibile di adattamenti e riattrezzature, e a questo servono dispositivi realizzati secondo standard costruttivi definiti.

Il **contenitore** per circuiti integrati assolve questo compito indipendentemente dalla complessità del circuito ospitato: con un numero appropriato di terminali, sempre standardizzato, esso trasferisce le connessioni del chip all'ambiente esterno. Dimensioni, forma e materiale utilizzato dipendono dal numero di segnali che il dispositivo deve interfacciare, e dalla necessità di dissipare nell'ambiente esterno il calore che si sviluppa nel chip durante le normali condizioni di funzionamento e ambientali. Il contenitore può essere realizzato in metallo, in plastica o in ceramica.

Per il collegamento fra il chip e i terminali si utilizzano le tradizionali tecniche di microsaldatura con filo d'oro, o la saldatura diretta tra i punti del chip da portare all'esterno e le piste del contenitore. I **terminali esterni** connessi con le piste del contenitore (**pin**, **lead**) permettono il passaggio dei segnali di ingresso/uscita, della linea di massa o delle tensioni di alimentazione. La loro disposizione sul contenitore può essere:

SIL
– Single in line
DIL
– Dual in line
PLLC
– Plastic leaded chip carrier

— su un solo lato (**SIL**);
— su due lati opposti (DIP o **DIL**);
— su tutti e quattro i lati (**PLLC**).

Il passo fra i terminali [1,27 mm (0,5″)], [2,54 mm (1,0″)] e fra le file dei terminali [7,62 mm (3,0″)], [15,24 mm (6,0″)] è standardizzato.

Vantaggi dell'uso dei circuiti integrati

Oltre al costo inferiore, rispetto a un circuito a componenti discreti il circuito integrato:

— occupa meno spazio ed è più leggero;
— richiede meno tempo per il montaggio;
— consuma meno potenza;
— è più affidabile.

Un'apparecchiatura che impiega prevalentemente circuiti integrati contiene un minor numero di circuiti stampati, di dimensioni più contenute, montabili più rapidamente e con minori possibilità di errore. Il consumo dei circuiti integrati e, di conseguenza, i problemi legati allo smaltimento del calore, sono minori di quelli di analoghe realizzazioni a componenti discreti, e l'alimentatore richiesto è più piccolo, meno pesante e più affidabile. La potenza che assorbe va da pochi microwatt a qualche centinaio di milliwatt. La maggiore affidabilità si deve al minor numero di connessioni che si devono realizzare a parità di prestazioni (in un circuito integrato occorre connettere solo i suoi reofori, mentre in un circuito equivalente a componenti discreti, occorre effettuare un grande numero di connessioni e quindi il rischio di guasti o malfunzionamenti è maggiore).

I circuiti integrati hanno sostituito i transistor in quasi tutte le applicazioni circuitali, anche se il transistor rimane insostituibile in alcune particolari configurazioni non ancora realizzate con microcircuiti, o quando nel circuito vi sono cadute di tensione elevate o forti correnti, o anche se la frequenza di lavoro è molto elevata (dell'ordine dei gigahertz).

I microcircuiti sono realizzati per elaborare segnali digitali e analogici.

I **microcircuiti digitali** possono contenere un elevato numero di componenti discreti perché ogni transistor internamente può assumere solo due stati funzionali: conduzione (0) o interdizione (1). Il circuito che elabora il segnale ha un guadagno unitario, per cui il guadagno di più stadi in cascata rimane unitario.

Nei **microcircuiti analogici** il segnale può assumere valori che mutano nel tempo, per cui un segnale elaborato da più stadi può essere amplificato fino a superare il valore limite della tensione massima applicabile. I transistor all'interno del microcircuito non sono quindi tutti identici: per gli stadi di uscita occorre costruire transistor più grandi (per poter dissipare una notevole potenza). I microcircuiti analogici possono contenere un numero di componenti elettronici più basso rispetto ai digitali.

Scale di integrazione

MOS
– Metal-oxide semiconductor

In base ai tipi di transistor utilizzati per la fabbricazione, i circuiti micrologici si possono suddividere in bipolari e **MOS**. La tecnologia bipolare è impiegata nella fabbricazione di circuiti analogici e circuiti logici che richiedono elevate velocità di commutazione (famiglie logiche TTL, ECL, I^2L). Le tecnologie basate sui vari tipi di transistor MOS offrono un'elevata densità di occupazione dell'area del substrato di silicio e vengono impiegate per realizzare i microcircuiti digitali (famiglie logiche NMOS, CMOS).

La densità di impacchettamento e di complessità di un circuito è indicata con vari acronimi, molto usati nella letteratura tecnica anglosassone:

SSI
– Small scale integration

— integrazione su piccola scala **(SSI)**, il circuito contiene funzioni logiche elementari realizzate con poche decine di transistor;

MSI
– Medium scale integration

— integrazione su scala media **(MSI)**, il circuito contiene unità logiche più complesse quali registri e decodificatori, ed è realizzato con alcune centinaia di transistor;

LSI
– Large scale integration

— integrazione su grande scala **(LSI)**, il circuito contiene unità logiche complesse quali memorie e unità aritmetico-logiche, e i microprocessori sono realizzati con migliaia di transistor;

VLSI
– Very large scale integration

— integrazione su grandissima scala **(VLSI)**, il circuito contiene veri e propri microcalcolatori con unità di controllo, memorie, interfacce di ingresso/uscita;

VHSI
– Very high scale integration

— scala di integrazione estremamente elevata **(VHSI)**, il circuito è di grande complessità (microprocessore a 32 bit, microcomputer).

Specifiche tecniche dei circuiti integrati

Un circuito integrato, di tipo logico e di tipo analogico, viene descritto nei fogli tecnici secondo uno schema espositivo comune a tutti i costruttori. In un foglio tecnico si troveranno le seguenti informazioni (▸ ***Fig. 8.2***):

— descrizione della funzione svolta;
— temperatura di funzionamento;
— valori limite (in genere i valori massimi) di funzionamento;
— circuito elettrico;
— schema a blocchi;
— dimensioni fisiche dei contenitori;
— rappresentazione delle connessioni;
— caratteristiche elettriche;
— configurazioni circuitali tipiche.

Le caratteristiche elettriche definiscono i principali parametri del circuito. Quando il valore di una grandezza è parametrico sono definite anche tutte le caratteristiche della grandezza indipendente (per esempio temperatura, tensione o corrente, carico di uscita, resistenza di ingresso). Queste informazioni permettono al tecnico di interpretare esattamente i valori forniti dal fabbricante per i vari parametri.

Fig. 8.2
Foglio tecnico di un circuito logico TTL (*fonte*: Motorola).

MOTOROLA
SEMICONDUCTOR
TECHNICAL DATA

MC54/74HC194

4-Bit Bidirectional Universal Shift Register
High-Performance Silicon-Gate CMOS

The MC54/74HC194 is identical in pinout to the LS194 and the MC14194B. It may be used as a level converter for interfacing TTL or NMOS outputs to High-Speed CMOS inputs. The device inputs are compatible with standard CMOS outputs; with pull-up resistors, they are compatible with LSTTL outputs.

This static shift register features parallel load, serial load (shift right and shift left), hold, and reset modes of operation. These modes are tabulated in the Function Table, and further explanation can be found in the Pin Description section.

- Output Drive Capability: 10 LSTTL Loads
- Outputs Directly Interface to CMOS, NMOS, and TTL
- Operating Voltage Range: 2 to 6 V
- Low Input Current: 1 µA
- High Noise Immunity Characteristic of CMOS Devices
- In Compliance with the Requirements Defined by JEDEC Standard No. 7A
- Chip Complexity: 184 FETs or 41 Equivalent Gates

J SUFFIX CERAMIC CASE 620
N SUFFIX PLASTIC CASE 648
D SUFFIX SOIC CASE 751

ORDERING INFORMATION

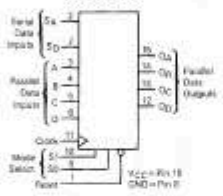
MC74HC00XN Plastic
MC54HC00XJ Ceramic
MC74HC00XD SOIC

T_A = −55° to 125°C for all packages.
Dimensions in Chapter 7.

PIN ASSIGNMENT

Reset	1	16	V_{CC}
S_A	2	15	Q_A
A	3	14	Q_B
B	4	13	Q_C
C	5	12	Q_D
D	6	11	Clock
S_D	7	10	S1
GND	8	9	S0

LOGIC DIAGRAM



FUNCTION TABLE

Inputs									Outputs				Operating Mode
Reset	S1	S0	Clock	Serial Data S_D	Serial Data S_A	Parallel Data A	B	C	D	Q_A	Q_B	Q_C	Q_D	
L	X	X	X	X	X	X	X	X	X	L	L	L	L	Reset
H	H	H	↑	X	a	a	b	c	d	a	b	c	d	Parallel Load
H	L	H	↑	X	H	X	X	X	X	H	Q_{An}	Q_{Bn}	Q_{Cn}	Shift Right
H	L	H	↑	X	L	X	X	X	X	L	Q_{An}	Q_{Bn}	Q_{Cn}	
H	H	L	↑	H	X	X	X	X	X	Q_{Bn}	Q_{Cn}	Q_{Dn}	H	Shift Left
H	H	L	↑	L	X	X	X	X	X	Q_{Bn}	Q_{Cn}	Q_{Dn}	L	
H	L	L	X	X	X	X	X	X	X	no change				Hold
H	H	L	L	X	X	X	X	X	X	no change				
H	H	H	X	X	X	X	X	X	X	no change				

H = high level (steady state)
L = low level (steady state)
X = don't care
↑ = transition from low to high level
a, b, c, d = the level of steady-state input at A, B, C, or D, respectively.
Q_{An}, Q_{Bn}, Q_{Cn}, Q_{Dn} = the level of Q_A, Q_B, Q_C, or Q_D, respectively, before the most recent ↑ transition of the clock.

MC54/74HC194

MAXIMUM RATINGS*

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{CC}	DC Supply Voltage (Referenced to GND)	−0.5 to +7.0	V
V_{in}	DC Input Voltage (Referenced to GND)	−1.5 to V_{CC} +1.5	V
V_{out}	DC Output Voltage (Referenced to GND)	−0.5 to V_{CC} +0.5	V
I_{in}	DC Input Current, per Pin	±20	mA
I_{out}	DC Output Current, per Pin	±25	mA
I_{CC}	DC Supply Current, V_{CC} and GND Pins	±50	mA
P_D	Power Dissipation in Still Air, Plastic or Ceramic DIP† SOIC Package†	750 500	mW
T_{stg}	Storage Temperature	−65 to +150	°C
T_L	Lead Temperature, 1 mm from Case for 10 Seconds (Plastic DIP or SOIC Package) (Ceramic DIP)	260 300	°C

This device contains protection circuitry to guard against damage due to high static voltages or electric fields. However, precautions must be taken to avoid applications of any voltage higher than maximum rated voltages to this high-impedance circuit. For proper operation, V_{in} and V_{out} should be constrained to the range GND ≤ (V_{in} or V_{out}) ≤ V_{CC}.
Unused inputs must always be tied to an appropriate logic voltage level (e.g., either GND or V_{CC}). Unused outputs must be left open.

*Maximum Ratings are those values beyond which damage to the device may occur. Functional operation should be restricted to the Recommended Operating Conditions.
†Derating — Plastic DIP: − 10 mW/°C from 65° to 125°C
Ceramic DIP: − 10 mW/°C from 100° to 125°C
SOIC Package: − 7 mW/°C from 65° to 125°C
For high frequency or heavy load considerations, see Chapter 4 subject listing on page 4-2.

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Symbol	Parameter		Min	Max	Unit
V_{CC}	DC Supply Voltage (Referenced to GND)		2.0	6.0	V
V_{in}, V_{out}	DC Input Voltage, Output Voltage (Referenced to GND)		0	V_{CC}	V
T_A	Operating Temperature, All Package Types		−55	+125	°C
t_r, t_f	Input Rise and Fall Time (Figure 1)	V_{CC} = 2.0 V	0	1000	ns
		V_{CC} = 4.5 V	0	500	
		V_{CC} = 6.0 V	0	400	

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Voltages Referenced to GND)

Symbol	Parameter	Test Conditions	V_{CC} V	Guaranteed Limit 25°C to −55°C	≤85°C	≤125°C	Unit
V_{IH}	Minimum High-Level Input Voltage	V_{out} = 0.1 V or V_{CC} − 0.1 V; $\|I_{out}\| \le 20$ µA	2.0	1.5	1.5	1.5	V
			4.5	3.15	3.15	3.15	
			6.0	4.2	4.2	4.2	
V_{IL}	Maximum Low-Level Input Voltage	V_{out} = 0.1 V or V_{CC} − 0.1 V; $\|I_{out}\| \le 20$ µA	2.0	0.3	0.3	0.3	V
			4.5	0.9	0.9	0.9	
			6.0	1.2	1.2	1.2	
V_{OH}	Minimum High-Level Output Voltage	V_{in} = V_{IH} or V_{IL}; $\|I_{out}\| \le 20$ µA	2.0	1.9	1.9	1.9	V
			4.5	4.4	4.4	4.4	
			6.0	5.9	5.9	5.9	
		V_{in} = V_{IH} or V_{IL}; $\|I_{out}\| \le 4.0$ mA	4.5	3.98	3.84	3.70	
		$\|I_{out}\| \le 5.2$ mA	6.0	5.48	5.34	5.20	
V_{OL}	Maximum Low-Level Output Voltage	V_{in} = V_{IH} or V_{IL}; $\|I_{out}\| \le 20$ µA	2.0	0.1	0.1	0.1	V
			4.5	0.1	0.1	0.1	
			6.0	0.1	0.1	0.1	
		V_{in} = V_{IH} or V_{IL}; $\|I_{out}\| \le 4.0$ mA	4.5	0.26	0.33	0.40	
		$\|I_{out}\| \le 5.2$ mA	6.0	0.26	0.33	0.40	
I_{in}	Maximum Input Leakage Current	V_{in} = V_{CC} or GND	6.0	±0.1	±1.0	±1.0	µA
I_{CC}	Maximum Quiescent Supply Current (per Package)	V_{in} = V_{CC} or GND; I_{out} = 0 µA	6.0	8	80	160	µA

NOTE: Information on typical parametric values can be found in Chapter 4 subject listing on page 4-2.

Quando la descrizione del modo in cui le misure sono state effettuate è troppo complessa per essere completamente tradotta in poche informazioni, si preferisce fornire lo schema del circuito usato per effettuare la misura, oppure rappresentare e definire i segnali di prova utilizzati.

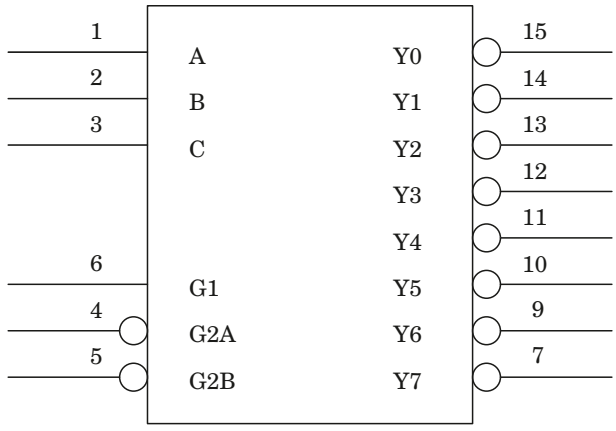
Rappresentazione grafica

Il simbolo generico dei circuiti integrati è un rettangolo con iscritte le sigle alfanumeriche che identificano i vari segnali. È opportuno separare i segnali di ingresso, i segnali di uscita e le linee di alimentazione (▸ ***Fig. 8.3***).

I segnali di ingresso sono disegnati sul lato sinistro del simbolo, quelli di uscita su quello destro, le linee di alimentazione sui due lati brevi del rettangolo, con la linea a potenziale maggiore in alto e quella a potenziale minore in basso. La spaziatura fra le linee che rappresentano i segnali dev'essere uniforme. Se i segnali possono essere raccolti in gruppi funzionali (linee di indirizzo, linee di selezione, linee di controllo) è buona norma utilizzare una spaziatura fra i vari gruppi, maggiore di quella usata all'interno di ogni singolo gruppo. Il simbolo così disegnato permette di studiare in

modo più semplice il funzionamento del circuito integrato. Se lo schema che si sta realizzando non è solo di principio, ma dev'essere utilizzato anche per l'esecuzione dei disegni di fabbricazione, vicino a ogni segnale occorre aggiungere l'indicazione del numero del terminale (*pin*) del contenitore.

Fig. 8.3
Simbolo grafico dei microcircuiti.

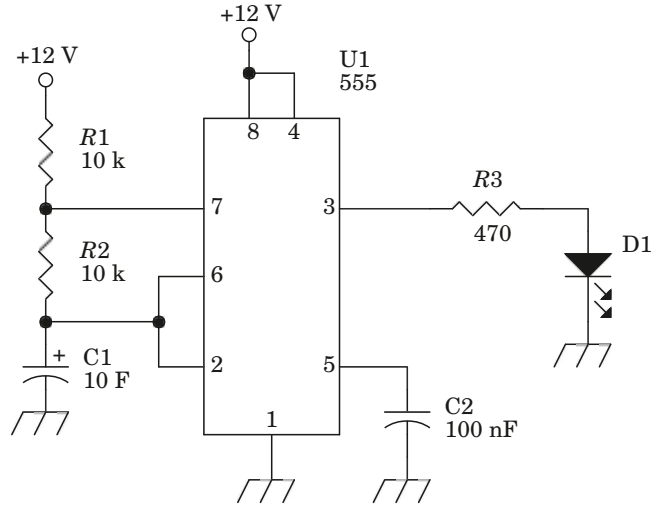


74LS138

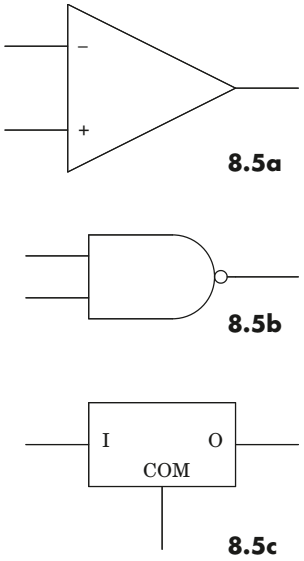
Nel rettangolo simbolico non è necessario né utile posizionare le variabili nella stessa sequenza utilizzata dal costruttore nel contenitore (*package*): quest'ultima dipende infatti dal modo in cui il circuito è stato realizzato sul substrato semiconduttore e da altre considerazioni tecnologiche, per cui in genere non rispecchia le relazioni funzionali fra i segnali. Dalla numerazione attribuita ai segnali dal costruttore è possibile ricavare unicamente l'informazione relativa al percorso dei collegamenti fra i vari componenti che formano il circuito.

Una rappresentazione funzionale del circuito integrato, separata dall'assegnazione dei pin, non solo mantiene tutte le informazioni necessarie per la sua costruzione, ma ne permette anche la facile e rapida interpretazione. È quindi da evitare una rappresentazione dei circuiti integrati come quella della ***figura 8.4***. Appare infatti subito evidente che non si potrebbe desumerne alcunché circa il funzionamento del dispositivo o la funzione circuitale svolta: si potrebbe solo connettere il dispositivo come

Fig. 8.4
Rappresentazione errata di un microcircuito.



IC
– Integrated circuit



Figg. 8.5a, b, c
Simboli grafici utilizzati per i circuiti integrati:
a. amplificatore operazionale;
b. porta NAND;
c. regolatore di tensione.

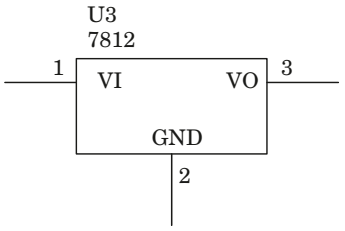


Fig. 8.6
Identificazione di un circuito integrato.

indicato dalla numerazione; lo schema realizzato è esclusivamente uno schema di cablaggio.

Dal 1986 i simboli dei microcircuiti impiegano una nuova simbologia, più complessa, ma che permette una descrizione più completa del dispositivo; abbiamo descritto tale simbologia nel ***volume 1*** (▸ ***Mod. H, Cap. 22***, scaricabile dal sito Internet). Per alcuni microcircuiti particolari, di tipo analogico o digitale, si utilizzano simboli grafici specifici. Le ***figure 8.5a, b, c*** mostrano i simboli dell'amplificatore operazionale della porta NAND e del regolatore di tensione.

Un microcircuito è identificato con la lettera U; talvolta, ma meno frequentemente, si utilizza anche la sigla IC (▸ ***Fig. 8.6***).

Applicazioni

I componenti microelettronici hanno rivoluzionato i metodi di progetto e di realizzazione delle apparecchiature elettroniche perché possono sostituire intere configurazioni circuitali che una volta venivano realizzate con componenti discreti.

I circuiti integrati sono utilizzati in informatica, nel controllo dei processi industriali, nella robotica, nelle telecomunicazioni, nelle apparecchiature militari e spaziali. Nelle telecomunicazioni i componenti microelettronici sono in piena fase di sviluppo nei progetti di sostituzione delle vecchie centrali di commutazione telefonica elettromeccaniche con centrali di tipo digitale, nei sistemi di comunicazione via satellite, nei sistemi di telematica (informatica e telecomunicazioni). Le applicazioni militari e spaziali rappresentano il settore applicativo e di ricerca più avanzato perché le apparecchiature elettroniche in questi campi diventano rapidamente obsolete.

Quando il volume di produzione o particolari esigenze di tipo commerciale o di sicurezza lo richiedono, i microcircuiti vengono costruiti per una specifica applicazione. Tipiche applicazioni di microcircuiti appositamente progettati sono quelle di tipo civile, dove la produzione di massa di beni di consumo crea le premesse economiche necessarie per rendere conveniente lo sviluppo di microcircuiti personalizzati. Negli anni Ottanta si sono particolarmente diffusi i microcircuiti custom realizzati dalla ditta costruttrice basandosi su specifiche di progetto fornite dal cliente; in questo modo è possibile costruire un microcircuito che può rendere l'apparecchiatura in cui viene inserito di più difficile riproduzione.

Lo studio e la realizzazione dei circuiti custom richiedono un notevole investimento economico per lo sviluppo delle specifiche e dei disegni di fabbricazione. Per la progettazione si utilizzano elaboratori elettronici che operano con sofisticati programmi di progetto CAD/CAE e di simulazione.

PER FISSARE I CONCETTI

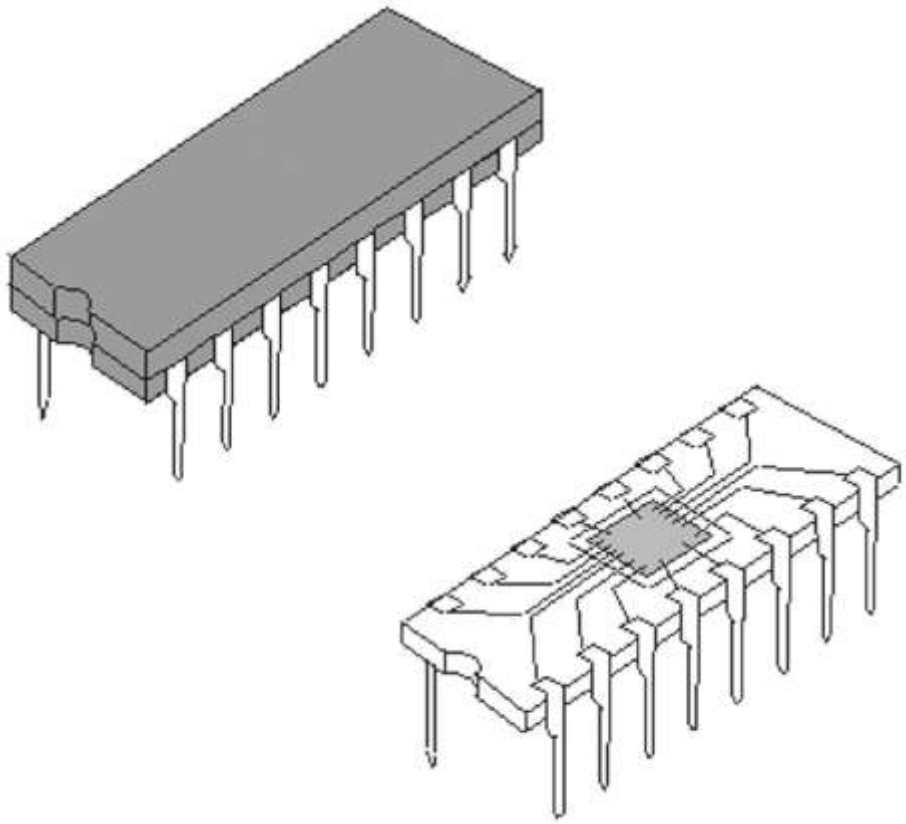
1. Quali vantaggi offrono i circuiti integrati rispetto ai componenti discreti?
2. Quali sono le scale di integrazione?

CAP 9 CIRCUITI MICROLOGICI DIGITALI

1 Famiglia logica TTL (Transitor Transistor Logica)
2 Sottofamiglie logiche
3 Famiglia logica ECL
4 Elementi logici FL (IIL)
5 Circuiti micrologici digitali unipolari
6 Famiglia logica NMOS
7 Famiglia logica CMOS
8 Sottofamiglie logiche CMOS

Concetti chiave

- Famiglie logiche unipolari
- Famiglie logiche bipolari
- Fan-in
- Fan-out
- Separatore di fase
- Scala di integrazione



SINTESI DEL MODULO E

CAPITOLO 8

Un **circuito monolitico integrato** è formato da una sottile piastrina di silicio monocristallino nella quale vengono ricavati e interconnessi migliaia di componenti elettronici quali resistenze, transistor, capacità, diodi.

— I circuiti integrati eseguono funzioni e prestazioni ottenibili anche con circuiti realizzati con componenti discreti, ma il costo complessivo di un circuito integrato equivalente è decisamente inferiore. Il circuito integrato occupa meno spazio, è più leggero, richiede meno tempo per il montaggio, consuma meno potenza, è più affidabile.

— I **microcircuiti digitali** possono contenere un elevato numero di componenti discreti perché ogni transistor internamente può assumere solo due stati funzionali: conduzione (0) o interdizione (1).

— Nei **microcircuiti analogici** il segnale può assumere valori che mutano nel tempo, per cui un segnale elaborato da più stadi può essere amplificato fino a superare il valore limite della tensione massima applicabile. I transistor all'interno del microcircuito non sono quindi tutti identici: per gli stadi di uscita occorre costruire transistor più grandi (per poter dissipare una notevole potenza). I microcircuiti analogici possono contenere un numero di componenti elettronici più basso rispetto ai digitali.

— In base ai tipi di transistor utilizzati per la fabbricazione, i circuiti micrologici si possono suddividere in bipolari e MOS. La tecnologia bipolare è impiegata nella fabbricazione di circuiti analogici e circuiti logici che richiedono elevate velocità di commutazione (famiglie logiche TTL, ECL, I^2L). Le tecnologie basate sui vari tipi di transistor MOS offrono un'elevata densità di occupazione dell'area del substrato di silicio e vengono impiegate per realizzare i microcircuiti digitali (famiglie logiche NMOS, CMOS).

CAPITOLO 9

I circuiti integrati digitali possono essere suddivisi in: bipolari e unipolari.

I sistemi digitali, in base alla complessità e alla densità di impacchettamento vengono suddivisi in cinque livelli di integrazione: SSI; MSI; LSI; VLSI; VHSI.

La velocità di funzionamento di una famiglia logica dipende dalla velocità di commutazione degli elementi attivi utilizzati, dalla configurazione circuitale adottata per realizzare la funzione logica e dal tempo di propagazione globale della porta.

Le famiglie logiche unipolari manifestano una dissipazione di potenza molto inferiore rispetto a quelle delle famiglie logiche bipolari, anche se (escluse le famiglie più recenti HC e AC) risultano molto meno veloci (C-MOS).

La capacità di interfacciamento di una porta logica dipende da due parametri caratteristici che indicano rispettivamente il massimo numero di ingressi che è possibile collegare a un'uscita (***fan-out***), senza deteriorarne il livello logico rendendolo intelligibile, e il numero massimo di uscite che è possibile collegare a un ingresso (***fan-in***). I dispositivi unipolari possiedono valori superiori ai dispositivi bipolari.

Quando si deve scegliere fra più famiglie che soddisfano le specifiche di progetto (velocità di commutazione, consumo, immunità al rumore ecc.), il costo e la gamma di funzioni logiche di ciascuna famiglia devono orientare la scelta del progettista. I dispositivi unipolari in genere costano meno di analoghi dispositivi bipolari, in quanto il processo di fabbricazione è più semplice e richiede meno fasi di lavorazione.

I dispositivi logici TTL sono realizzati utilizzando la tecnologia bipolare, per cui sono estremamente veloci, ma a parità di funzione logica svolta, utilizzano soluzioni circuitali più complesse e ingombranti e dissipano una maggiore potenza rispetto alle famiglie logiche basate sulla tecnologia MOS; per questi motivi non si realizzano dispositivi TTL a larga e larghissima integrazione.

Dalla famiglia fondamentale TTL (serie 74) sono scaturite nel tempo delle varianti, ciascuna delle quali ha apportato dei miglioramenti ad alcune caratteristiche statiche o dinamiche della famiglia, peggiorandone però talvolta altre.

– Gli elementi comuni alle varie sottofamiglie sono il valore della tensione di alimentazione, il valore dei livelli logici (non la capacità di pilotaggio), la disposizione dei pin (salvo qualche rara eccezione).

– Per ridurre l'assorbimento in corrente di una famiglia logica TTL (e quindi il consumo), è necessario aumentare il valore delle resistenze interne; questa soluzione però comporta un aumento dei tempi di propagazione delle porte dovute a un aumento delle costanti di tempo.

La famiglia logica N-MOS utilizza esclusivamente transistor MOS a canale N ad arricchimento, ed è caratterizzata dall'impiego di un transistor come resistenza di pull-up interna. Inoltre, questa soluzione tecnologica riduce in modo netto le capacità parassite presenti nel circuito, con un conseguente miglioramento del comportamento del dispositivo alle alte frequenze.

Sia la serie C-MOS standard sia la versione 74C sono realizzate utilizzando la tecnologia tradizionale dei circuiti MOS del gate metallico (*metal gate*) e presentano pertanto tempi di propagazione nettamente superiori a quelli delle famiglie TTL. I nuovi circuiti C-MOS che utilizzano la tecnologia del gate al silicio (*silicon gate*) e il processo di drogaggio a impiantazione ionica, riducendo la lunghezza del canale a 3 m, hanno raggiunto tempi di commutazione paragonabili a quelli delle sottofamiglie TTL più veloci. La tecnologia utilizzata è denominata *3 micrometer gate HC-C-MOS tecnology*.

Le porte HC e HCT sono caratterizzate da una velocità di commutazione e da una capacità di pilotaggio in uscita (sono tutte bufferizzate) analoghe a quelle delle porte TTL LS, nonché da un assorbimento di potenza a regime statico e da una corrente assorbita agli ingressi trascurabili come nelle porta C-MOS.

VERIFICHE

1.
Quali sono i principali vantaggi offerti dall'utilizzo dei circuiti integrati nella progettazione elettronica?

2.
Qual è la funzione del contenitore di un circuito integrato?

3.
Che differenza c'è tra un contenitore di tipo SIL e uno di tipo DIP?

4.
Come vengono classificati i microcircuiti digitali?

5.
Quali sono le principali applicazioni dei circuiti integrati?

6.
Che cosa si intende per resa di una fetta?

7.
Che cos'è un circuito ibrido?

8.
Che cosa differenzia un circuito Ibrido a film spesso da uno a film sottile?

9.
Descrivi la configurazione circuitale di una porta NAND standard.

10.
Descrivi il funzionamento di un inverter C-MOS standard.

11.
Quali sono i vantaggi offerti dalle sottofamiglie logiche C-MOS TTL compatibili?

12.
Quali accorgimenti tecnologici hanno permesso la riduzione dei tempi di propagazione delle porte C-MOS della serie HC rispetto a quelli delle porte tradizionali della serie 4000?

MODULO F

Circuiti integrati per applicazioni specifiche

CAP 10

DISPOSITIVI LOGICI PROGRAMMABILI E A MASCHERATURA

CAP 11

PROGRAMMAZIONE DEI PLD

Prerequisiti

- Algebra di Boole e sistemi di minimizzazione delle funzioni logiche.
- Progetto dei circuiti logici combinatori e sequenziali.
- Uso del personal computer.

Obiettivi

Conoscenze

- Campi applicativi dei dispositivi logici programmabili (PLD).
- Principio di funzionamento dei PLD.
- Tecnologia costruttiva dei PLD.
- Principali linguaggi di programmazione dei PLD.

Competenze

- Saper progettare e realizzare apparecchiature elettroniche che impiegano componenti programmabili.
- Saper valutare il contributo, in termini di efficienza e di efficacia, che l'inserimento di un PLD può apportare a un progetto.
- Saper simulare il funzionamento di un PLD con gli appositi programmi.

CAP 10

DISPOSITIVI LOGICI PROGRAMMABILI E A MASCHERATURA

Concetti chiave

- ASIC
- Celle standard
- Gate array
- Mappa di programmazione
- PAL
- Porte equivalenti

1 Dispositivi logici programmabili
2 Dispositivi logici a mascheratura

Approfondimento: Tecnologia dei dispositivi PLD bipolari

I campi applicativi dell'elettronica si stanno rapidamente espandendo e le apparecchiature diventano sempre più complesse. Il numero di componenti impiegati (SSI, MSI, LSI e VLSI) è divenuto tale da richiedere tecniche di assemblaggio sempre più sofisticate e costose. I circuiti integrati realizzati dalle industrie elettroniche non sono però ottimizzati per una particolare applicazione: vengono prodotti per rispondere alle esigenze di uno spettro più o meno ampio di utilizzatori che, operando opportuni collegamenti, usufruiscono di una minima parte delle funzioni logiche implementate o delle capacità di pilotaggio del dispositivo.

Per la specificità e la peculiarità delle prestazioni richieste, alcuni apparati non possono essere realizzati con dispositivi integrati LSI di uso normale, e anche l'uso di un microprocessore può portare a una progettazione software eccessivamente complicata o a una realizzazione hardware sovradimensionata o troppo lenta per il raggiungimento dell'obiettivo desiderato. Il metodo di progetto basato sui dispostivi SSI, MSI e LSI tradizionali presenta infatti parecchi inconvenienti:

— il numero di integrati da impiegare per realizzare funzioni complesse è in costante aumento, con conseguente proliferazione delle interconnessioni e minore affidabilità globale del prodotto finale;
— l'aumento delle dimensioni e della complessità dei circuiti stampati (dovuto al maggior numero di circuiti integrati) determina la lievitazione dei costi e la realizzazione di apparati inutilmente voluminosi;
— è necessario stoccare in magazzino un numero elevato di prodotti diversi con il rischio, in fase di produzione, di risentire della temporanea mancanza di alcuni dispositivi sul mercato, oppure, all'opposto, di accumulare componenti molto soggetti a obsolescenza;
— il progettista è vincolato ad architetture predefinite nell'ambito dei singoli componenti utilizzati, con la conseguenza di ridurre l'efficienza delle singole funzioni logiche.

Un passo avanti per migliorare l'efficienza dei progetti elettronici è stato compiuto con lo sviluppo dei **circuiti full-custom**, e cioè dispositivi che i produttori di componenti elettronici mettono a punto a partire dal bisogno specifico del cliente, personalizzandone e ottimizzandone la configurazione circuitale, e le caratteristiche elettriche statiche e dinamiche. Questa soluzione è assai diffusa nei campi dell'industria automobilistica, dell'avionica, delle calcolatrici ecc. Si tratta di una scelta tecnica onerosa dal punto di vista economico, valida nelle applicazioni civili solo se il volume di produzione previsto (molte migliaia di pezzi) è tale da giustificarla; ha registrato invece un largo impiego nell'industria militare e aerospaziale meno vincolata di altri settori operativi a considerazioni economiche, e più esigente circa le caratteristiche dei componenti elettronici impiegati.

I circuiti full-custom sono difficilmente copiabili e riproducibili con

componenti discreti per cui il rischio di operazioni di *reverse engineering* (copiatura dell'apparecchiatura) è praticamente nullo. Il loro impiego è interessante per molte realizzazioni elettroniche, ma è poco flessibile: eventuali modifiche delle specifiche di progetto richiedono lo sviluppo di un nuovo componente, oppure adattamenti circuitali esterni che limitano, almeno in parte, i benefici offerti da questa tecnologia. Alla richiesta proveniente dal mercato di maggiore flessibilità dei circuiti full-custom, l'industria elettronica ha risposto con una nuova categoria di circuiti integrati di tipo semi-custom che combinano la modularità e la flessibilità dei circuiti standard con l'affidabilità e l'economicità dei circuiti full-custom.

La definizione **semi-custom** raccoglie un insieme di circuiti molto differenti fra loro che contengono porte logiche, circuiti sequenziali, dispositivi discreti assemblati in modo tale che un numero significativo di interconnessioni risulta incompleto; sarà l'utente che, con apposite apparecchiature di programmazione, realizzerà le interconnessioni mancanti generando le funzioni logiche di cui ha bisogno. Nella letteratura anglosassone questi circuiti sono chiamati **circuiti integrati per applicazioni specifiche (ASIC)**.

ASIC
– Application specific integrated circuit

Gli ASIC attualmente esistenti possono essere suddivisi in: dispositivi programmabili e dispositivi a mascheratura.

Nei **dispositivi programmabili** le funzioni logiche elementari sono già state realizzate e parzialmente interconnesse dal fabbricante: l'utente si limita a utilizzare queste risorse per realizzare il circuito desiderato. La programmazione corretta e affidabile dei componenti viene effettuata con macchine apposite e con i sistemi CAE, che consentono di programmare i componenti in modo corretto e affidabile.

CAE
– Computer aided engineering

Le informazioni possono essere fornite al programma che gestisce il componente in molte forme: codice binario, formula booleana, schema a contatti elettromeccanici, schema digitale (*schematic entry*), diagramma dei tempi, diagramma di flusso, macrolinguaggio. Il software di programmazione (Palasm, Abel, VHDL ecc.) trasferisce le **equazioni booleane**, opportunamente ridotte, a una mappa dei fusibili da programmare. I **data entry grafici**, che eliminano le procedure lente e noiose della formulazione e della riduzione delle equazioni logiche, consentono al progettista di concentrarsi sulla struttura e sulla funzionalità del sistema da realizzare, senza perdersi nelle mappe dei fusibili o nell'ottimizzazione della partizione logica elementare del progetto.

I **dispositivi a mascheratura**, progettati impiegando una serie di funzioni logiche predefinite (*macrocells*), vengono simulati al calcolatore e poi convertiti in maschere per la produzione su silicio. La documentazione prodotta dall'elaboratore viene poi utilizzata dal costruttore per realizzare il dispositivo. I tempi di sviluppo e i costi di un dispositivo di questo tipo sono minori di quelli di un progetto full-custom analogo.

La scelta fra le due soluzioni tecnologiche dipende dalla complessità della funzione da sintetizzare e dal volume di impiego previsto. I dispositivi a mascheratura richiedono che l'utilizzatore assuma nei confronti del produttore una serie di impegni, come la garanzia dell'acquisto di una quantità minima di dispositivi (qualche migliaia), e si accolli una parte di spese di sviluppo delle maschere di programmazione. I dispositivi a mascheratura sono quindi più flessibili e più complessi di quelli programmabili, ma comportano più oneri per l'utente. I dispositivi programmabili,

invece, richiedono soltanto l'acquisizione di un'apparecchiatura *ad hoc*.

L'uso di dispositivi programmabili permette di adattare perfettamente il circuito integrato alle esigenze dell'applicazione, ottenendo maggiore efficienza, riduzione del numero di elementi circuitali e maggiore affidabilità dell'apparecchiatura finale. Un'altra caratteristica non secondaria offerta dai dispositivi programmabili è la possibilità di rendere segreto il progetto, dato che è possibile utilizzare dispositivi che, a programmazione ultimata, bloccano la lettura delle configurazioni interne.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Che cos'è un dispositivo ASIC?
2. Che cos'è un dispositivo a logica programmabile?
3. Con quali metodi è possibile programmare un dispositivo logico programmabile?

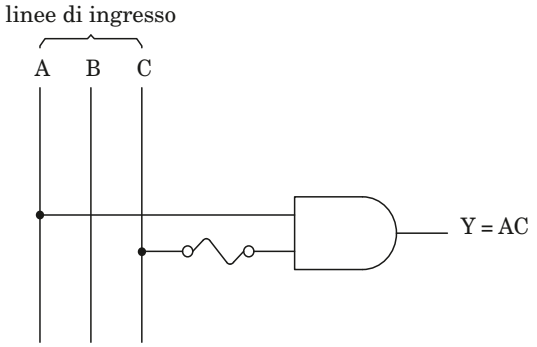
1 DISPOSITIVI LOGICI PROGRAMMABILI

PAL e PLA

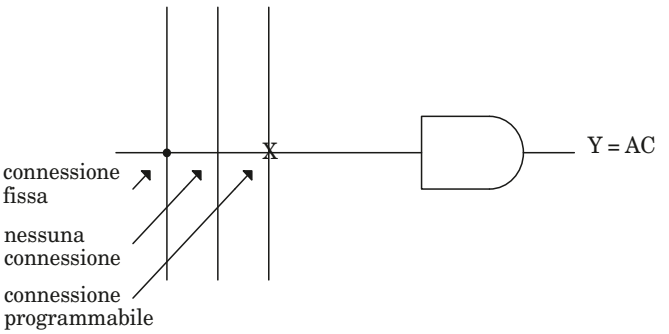
Un dispositivo logico programmabile consiste di una matrice di fusibili (come le PROM) che collegano gli ingressi logici (con i rispettivi complementi) a porte AND, a loro volta collegate a porte OR. In effetti, il termine *fusibile* si riferisce a soluzioni tecnologicamente differenti: può trattarsi di un fusibile vero e proprio, come quelli utilizzati nelle PROM, oppure di collegamenti programmabili e cancellabili come quelli che utilizzano la tecnologia MOS a gate fluttuante (EPROM, EEPROM).

La rappresentazione grafica dello schema interno di un dispositivo programmabile, che illustri tutti gli ingressi interessati e tutti gli elementi circuitali, è molto complessa e di difficile interpretazione e leggibilità. Si adotta quindi un metodo grafico diverso (▸ ***Figg. 10.1a, b***): le varie linee di ingresso vengono sostituite da un'unica linea sulla quale vengono identificate le connessioni degli ingressi: un pallino se la connessione è permanente, una crocetta se la connessione è dovuta a un fusibile che non è stato fuso durante la fase di programmazione, nessun segno (solo un attraversamento) se non vi è connessione in quanto il fusibile di collegamento è stato fuso.

Figg. 10.1a,b:
a. rappresentazione delle linee di ingresso con una linea unica;
b. rappresentazione dell'assenza di connessione (attraversamento), del collegamento fisso (pallino), della connessione programmabile (crocetta).



10.1a



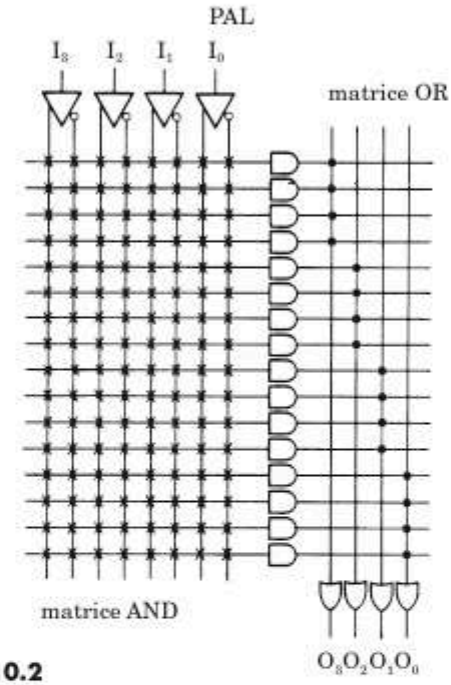
10.1b

PAL
– Programmable array logic

Se i collegamenti con la matrice di OR sono fissi mentre quelli di AND sono programmabili il dispositivo viene chiamato **logica a matrice programmabile (PAL)**. La ***figura 10.2*** mostra lo schema di una PAL caratterizzata da 4 linee di ingresso, 16 linee di prodotto e 4 linee di uscita. Poiché una qualsiasi funzione logica può essere espressa come somma logica di prodotti logici (forma esplicita), con una PAL (o più) si possono realizzare tutte le funzioni logiche combinatorie a due livelli.

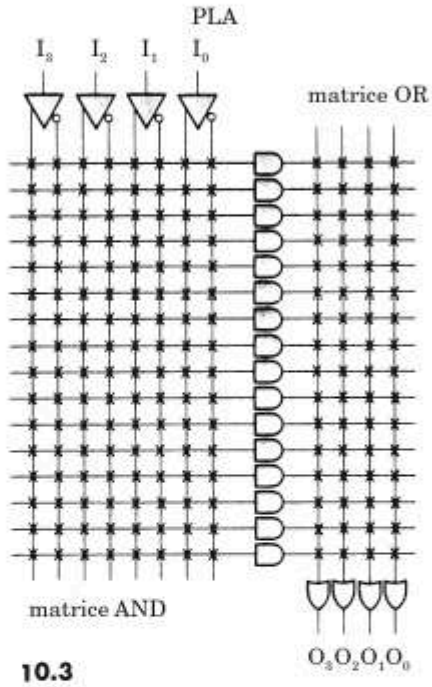
PLA
– Programmable logic array

Se sia i collegamenti di ingresso di AND sia quelli di uscita di OR sono programmabili, il dispositivo logico è detto **matrice a logica programmabile (PLA)**. La ***figura 10.3*** presenta lo schema logico interno di una PLA a 4 linee di ingresso, 16 linee di prodotto e 4 linee di uscita.



10.2

Fig. 10.2
Struttura interna di una PAL; la matrice AND è programmabile mentre la matrice OR è fissa.



10.3

Fig. 10.3
Struttura interna di una PLA; entrambe le matrici AND e OR sono programmabili.

La funzione logica della ***figura 10.4*** è stata implementata con porte logiche a due livelli come somma di prodotti logici; le ***figure 10.5a, b*** mostrano la realizzazione della stessa funzione con una PLA a 4 ingressi e 2 uscite. In alcune realizzazioni è possibile definire l'inversione logica dei singoli segnali di uscita con l'impiego di apposite porte EX-OR, e questo permette di sintetizzare, per mezzo dei teoremi di De Morgan, funzioni più complesse di quelle ottenibili con PAL e PLA normali.

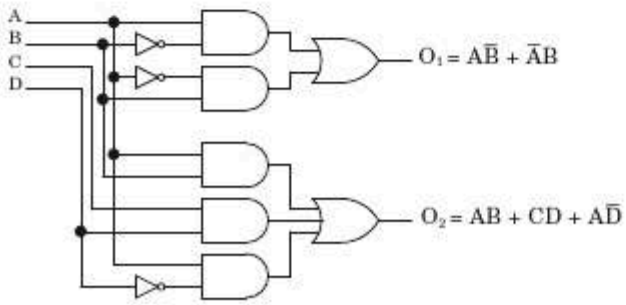
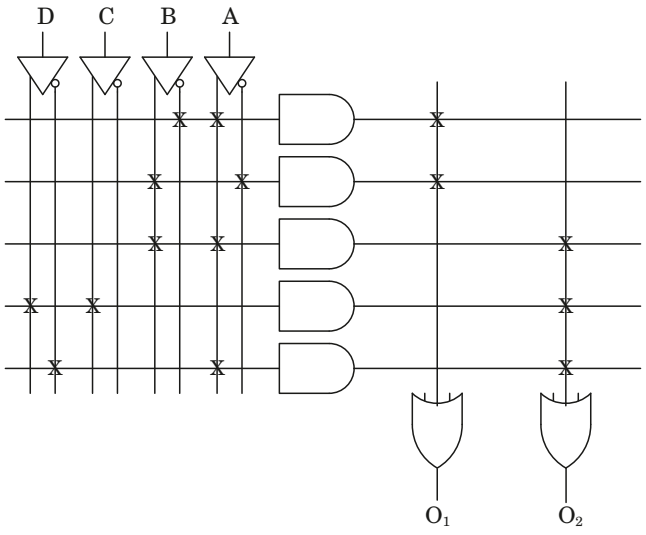


Fig. 10.4
Rappresentazione convenzionale di una funzione logica implementata mediante due livelli di porte logiche come somma di prodotti.

Figg. 10.5a, b
Rappresentazione della stessa funzione della figura 10.4 con la logica programmabile; il dispositivo utilizzato è una PLA a 4 ingressi e 2 uscite:
a. schema logico interno;
b. metodi di rappresentazione della funzione logica.



10.5a

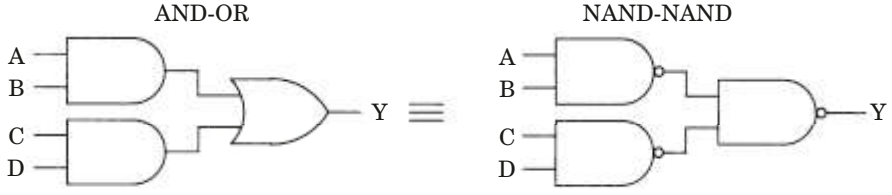
$O_1 = A\overline{B} + \overline{A}B \quad O_2 = AB + CD + A\overline{D}$

10.5b

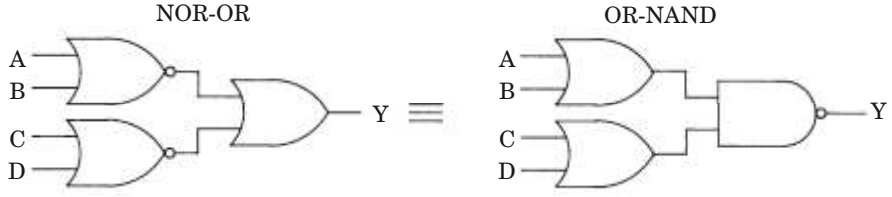
La matrice AND-OR non è l'unica disponibile: i dispositivi inclusi nell'elenco che segue, che impiegano matrici differenti, realizzano la stessa funzione logica (▸ ***Fig. 10.6***):

AND-OR NAND-NAND;
NOR-OR OR-NAND;
AND-NOR NAND-AND;
NOR-NOR OR-AND.

Fig. 10.6
Matrici logiche equivalenti: AND-OR, NAND-NAND; NOR-OR, OR-NAND.



$$Y = A \cdot B + C \cdot D = \overline{\overline{A \cdot B} \cdot \overline{C \cdot D}}$$



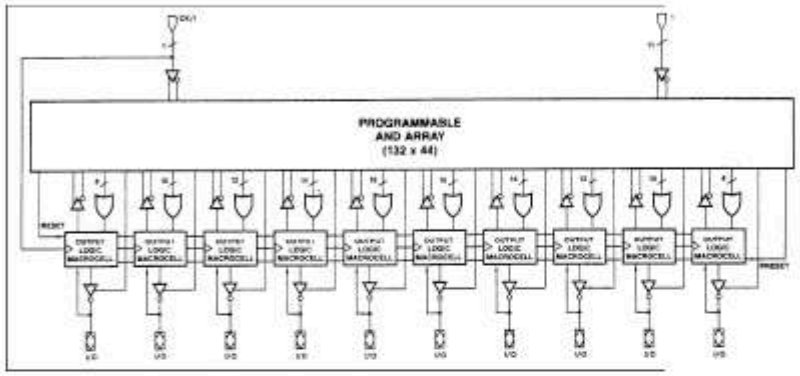
$$Y = \overline{A + B} + \overline{C + D} = \overline{(A + B)\ (C + D)}$$

Il livello logico attivo (alto o basso) del segnale di uscita può essere fisso o programmabile; l'uscita può anche essere a collettore aperto o del tipo a tre stati (*three-state*).

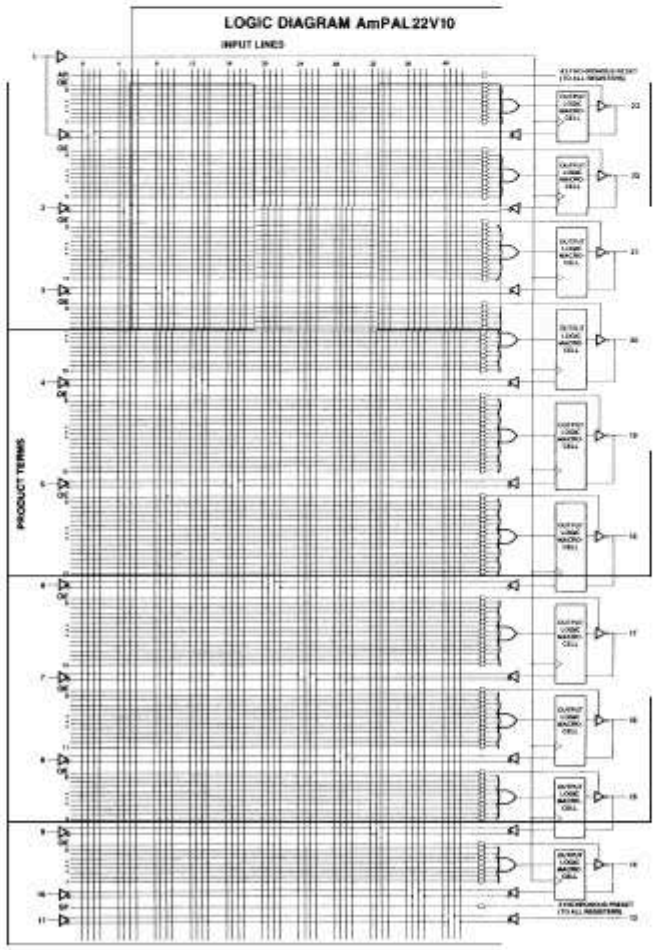
PLD

PLD
– Programmable logic device
PLS
– Programmable logic sequencer

Le PAL e le PLA possono sintetizzare solo circuiti in logica combinatoria; per la sintesi dei circuiti sequenziali si utilizzano i dispositivi **PLD** o **PLS** con struttura a matrici di porte che contengono buffer sulle linee di ingresso e di uscita (anche bidirezionali), elementi di memoria (flip-flop) e linee di retroazione. Questi dispositivi possono sintetizzare, tramite automi a stati finiti, macchine sequenziali (di Mealy) programmate per percorrere in maniera sincrona, in funzione di un segnale di clock esterno, una tabella degli stati. Ogni dispositivo PLD comprende un gran numero di blocchi funzionali interni contenenti elementi sequenziali. Le ***figure 10.7a, b***



10.7a



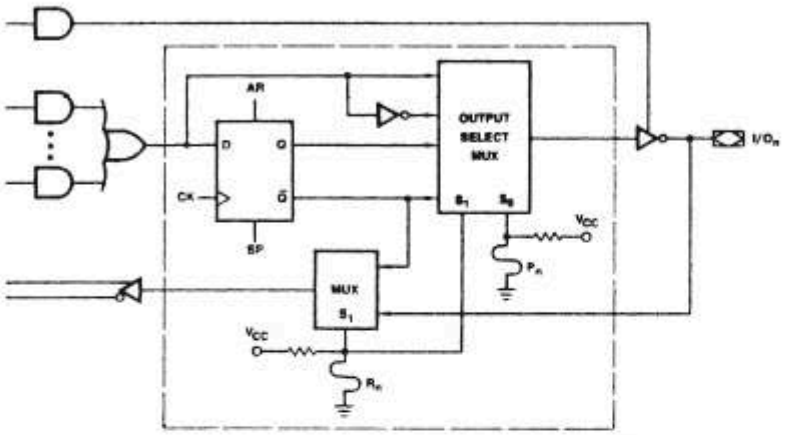
10.7b

Figg. 10.7a, b
Matrice AND-OR della PAL 22V10 (*fonte*: Advanced Micro Devices):
a. schema a blocchi;
b. schema logico.

Figg. 10.8a, b
Possibili configurazioni della macrocella d'uscita della PAL 22V10 (*fonte*: Advanced Micro Devices):
a. schema logico della base;
b. schemi applicativi.

mostrano lo schema a blocchi e lo schema logico del dispositivo con architettura universale PAL 22V10 che possiede 22 ingressi e 10 uscite.

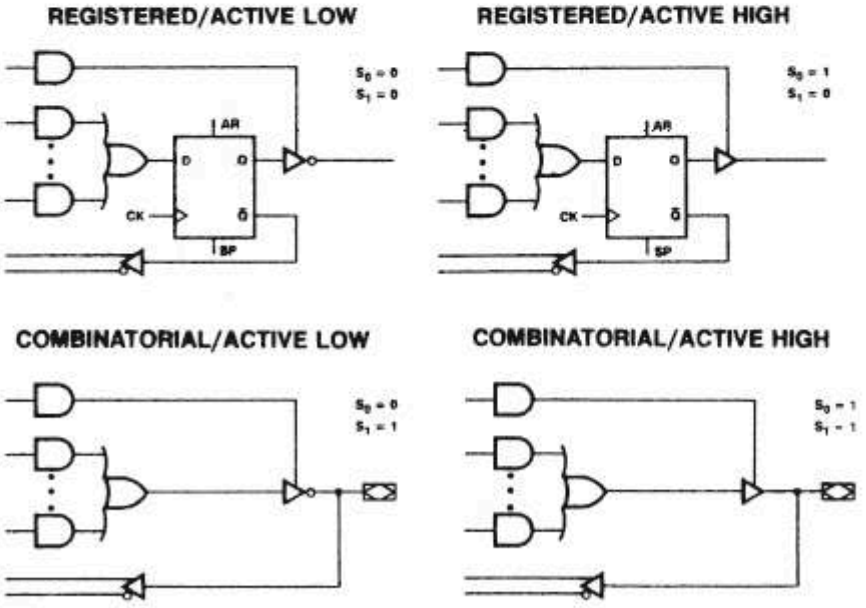
Le ***figure 10.8a, b*** illustrano la configurazione delle relative macrocelle. Questa configurazione mette in evidenza che il dispositivo può essere programmato per essere utilizzato sia come circuito combinatorio sia come circuito sequenziale, stabilendo anche il livello logico attivo del segnale.



S_1	S_0	Output Configuration
0	0	Registered/Active Low
0	1	Registered/Active High
1	0	Combinatorial/Active Low
1	1	Combinatorial/Active High

0 = Unblown Fuse
1 = Blown Fuse

10.8a



10.8b

Le PAL e le PLD programmabili sono realizzate in tecnologia bipolare e in CMOS. I dispositivi bipolari sono programmati con la fusione di un microfusibile interno (*fuse-link*), come le memorie PROM. I dispositivi a tecnologia CMOS adottano la tecnologia FAMOS a gate fluttuante (▸ ***Fig. 10.9***), analoga a quella usata per le memorie EPROM, EEPROM e FLASH, che consente la cancellazione e la riprogrammazione dei dispositivi; questo tipo di PLD è denominato **FPGA**. Sono utilizzate anche le sigle **EPLD**, **EPAL** e **CPLD**.

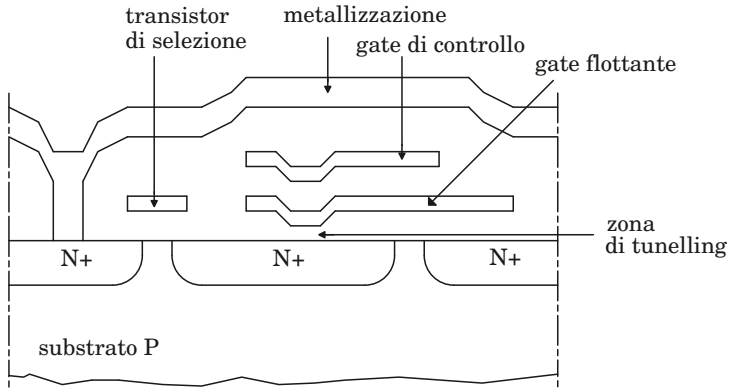


Fig. 10.9
Sezione della struttura di un transistor MOS a gate fluttuante (transistor FAMOS) utilizzato per la programmazione delle celle EPAL e le memorie EPROM ed EEPROM:

FPGA
– Field programmable gate array
EPLD
– Erasable PLD
EPAL
– Erasable PAL
CPLD
– Complex programmable logic device
GAL
– Generic array logic
ISP
– In system programmable
LCA
– Logic cell array

La cancellazione può avvenire tramite l'esposizione del chip all'azione di una radiazione ultravioletta (PAL di tipo EPROM), oppure tramite impulsi elettrici come per le EEPROM (E^2PROM); nel secondo caso le PAL vengono chiamate E^2PAL e **GAL**. Questi dispositivi, che possono essere cancellati e riprogrammati senza toglierli dalla scheda, sono indicati nella letteratura come dispositivi **ISP**. Vengono in genere realizzati con la tecnologia MOS e CMOS, che consente di ottenere alti livelli di integrazione e dispositivi più complessi e versatili.

Alcuni costruttori ottengono la riprogrammabilità mediante componenti, detti **LCA**, che si autoconfigurano all'atto dell'accensione dell'alimentazione andando a leggere una memoria di programma esterna (per esempio una EPROM); questa tecnologia RAM è stata originariamente realizzata dalla Xilinx. La riprogrammazzione può essere eseguita via software, scrivendo direttamente nella memoria RAM interna, o via hardware con una EPROM esterna, senza che sia necessario estrarre il componente dal circuito stampato come invece è necessario fare con le EPLD.

I dispositivi EPLD programmabili tramite EPROM garantiscono una realizzazione a chip singolo e una buona sicurezza del progetto perché in genere è possibile impedire la rilettura esterna del programma memorizzato; i dispositivi a memoria esterna LCA, invece, offrono una scala di integrazione maggiore e una più facile programmabilità, ma sono carenti in fatto di sicurezza perché sono facilmente riproducibili.

La tecnologia EPROM è stata utilizzata anche con le PAL di tipo combinatorio per realizzare dispositivi programmabili e cancellabili detti **programmabili sul campo** (**FPLA**, FPGA). La tecnologia più utilizzata è la CMOS, ma non mancano realizzazioni in tecnologia bipolare MOS e BiCMOS. Sono disponibili anche PLD e PAL all'arseniuro di gallio, caratterizzate da tempi di propagazione alquanto contenuti (circa 7,5 ns) e da bassa dissipazione di potenza.

FPLA
– Field PLA

La riprogrammabilità dei dispositivi consente di ridurre la quantità di pezzi da tenere in magazzino e di conseguire un'elevata flessibilità produttiva, cosa che si rivela utile sia nella fase di realizzazione dei prototipi sia nelle fasi di test e di verifica iniziale e finale del prodotto. La riprogrammabilità dei dispositivi cancellabili elimina il rischio legato alla loro pre-programmazione per la linea di produzione. La pre-programmazione dei dispositivi viene fatta per risparmiare tempo e ottimizzare il ciclo produttivo, ma se per sopravvenute modifiche del progetto è necessario modificare la configurazione programmata, si corre il rischio di gettare via una notevole quantità di materiale. I dispositivi cancellabili permettono di riutilizzare uno stock di dispositivi già programmati, riprogrammandoli secondo le varianti del progetto.

Le logiche programmabili prodotte dai diversi costruttori possono essere suddivise in due grandi categorie:

— logiche standard, che presentano caratteristiche elettriche analoghe e utilizzano configurazioni circuitali simili;
— logiche di tipo particolare, che vengono prodotte da un solo costruttore.

La versatilità, qualità che dipende dalla complessità dei circuiti logici che un componente programmabile è in grado di realizzare, viene in genere misurata in **porte equivalenti**.

I **segnali**, di solito, sono TTL compatibili, e la tensione di alimentazione è di +5 V.

Software per la programmazione dei PLD

Il software sviluppato per programmare un circuito PLD è realizzato in modo da non richiedere al progettista la conoscenza approfondita del dispositivo. Una procedura standard per la programmazione dei PLD prevede l'introduzione dei dati iniziali sotto forma di schema logico, di equazioni logiche, di descrizione di macchine a stati finiti o anche di lista dei collegamenti (*netlist*) tramite un editor di testi, seguita dalla riduzione logica, dalla simulazione e dalla definizione di un file di programmazione nel formato standard JEDEC. La realizzazione finale del dispositivo viene effettuata con gli stessi programmatori hardware utilizzati per le EPROM. Una volta programmato, il dispositivo è sottoposto a una fase di test per accertare che operi secondo le specifiche desiderate; se il dispositivo è riprogrammabile, la verifica può essere effettuata direttamente sulle realizzazioni finali ed eventuali errori possono essere corretti semplicemente riprogrammandolo.

I dispositivi possiedono celle di sicurezza, che precludono l'accesso alla mappa di programmazione, e una parola di contrassegno elettronico che impedisce cancellazioni involontarie durante i test, o durante il normale funzionamento, e che abilita la riprogrammazione solo in presenza di definite sequenze di bit. Se si intendono realizzare circuiti combinatori (quali convertitori di codice, decodificatori e driver per display a 7- segmenti ecc.) il dispositivo da realizzare è descritto con tabelle della verità. I diagrammi di stato sono utilizzati per descrivere sequenziatori logici e macchine a stati. Le equazioni logiche, scritte utilizzando gli operatori sia booleani sia aritmetici, e quelli relazionali, sono utili per descrivere contatori, multiplexer, decodificatori. La descrizione del dispositivo tramite schema circuitale viene utilizzata per realizzare memorie e insiemi di registri.

2 DISPOSITIVI LOGICI A MASCHERATURA

I dispositivi PLA e PLD possono essere configurati (come avviene per le ROM) personalizzando l'ultima fase di deposizione dei microcollegamenti in alluminio sul chip (mascheratura): in questo caso i dispositivi vengono denominati **gate array**.

In genere all'utente viene offerta la possibilità di personalizzare il progetto in una fase più avanzata della produzione del circuito integrato; la casa produttrice fornisce un circuito integrato su cui sono stati realizzati da quattro a sei livelli di mascheratura e l'utilizzatore può scegliere come effettuare le successivi fasi (da 1 a 5).

Il dispositivo viene progettato utilizzando blocchi logici elementari che eseguono funzioni logiche predefinite (*macrocells*), disposte secondo un'organizzazione a matrice (per righe e colonne), simulato al calcolatore e poi convertito in maschere per la produzione da un programma chiamato **compilatore di silicio**.

Concettualmente questo programma è simile ai compilatori software, anche se la complessità del problema che risolve non è di tipo sequenziale-temporale, ma di tipo dimensionale.

Di ogni dispositivo i costruttori forniscono, nella libreria del sistema CAD, una descrizione memorizzata che comprende le regole tecnologiche, tra le quali il numero dei livelli di metallizzazione usati per il tracciamento delle interconnessioni (*routing*), la spaziatura fra le piste di interconnessione, la larghezza delle connessioni ecc.

Un gate array è costituito da centinaia a migliaia di porte equivalenti, separate l'una dall'altra da canali nei quali sono realizzate le interconnessioni; lungo i lati esterni del dispositivo sono collocati i buffer di ingresso/uscita e le piazzole di collegamento con i terminali del contenitore (▸ ***Fig. 10.10***).

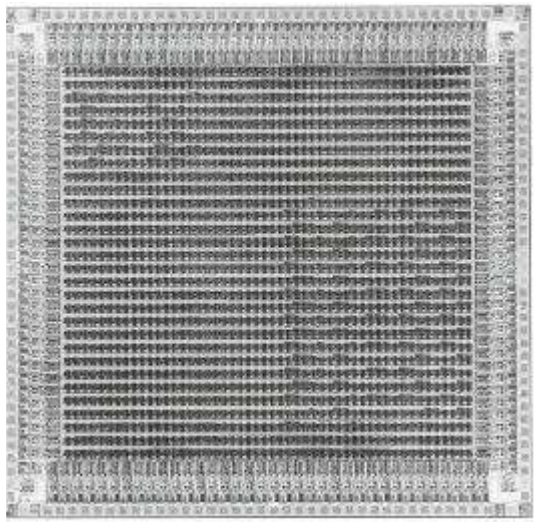
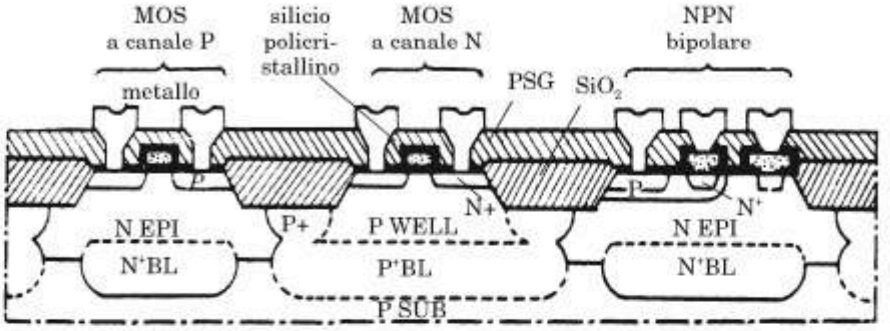


Fig. 10.10
Gate array Bi-CMOS μPD67030; contiene 3140 porte e 140 linee di ingresso/uscita (*fonte*: Nec).

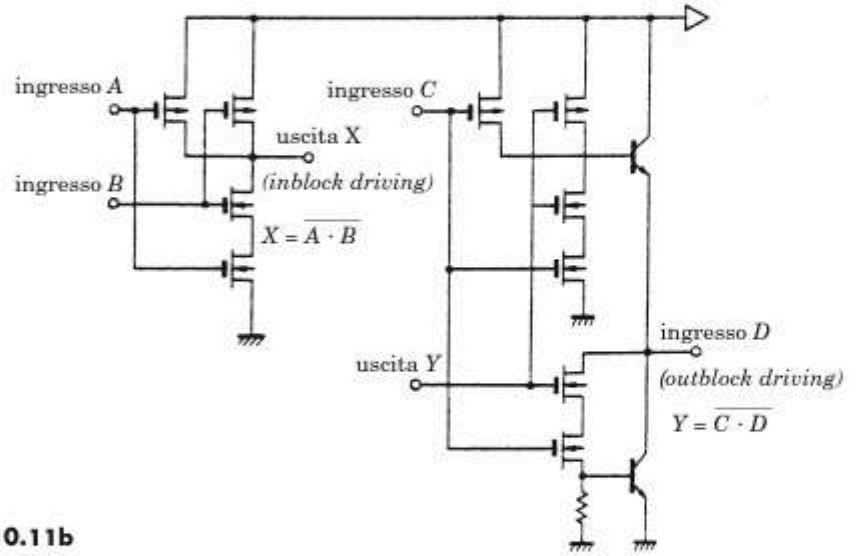
La tecnologia che viene maggiormente utilizzata nella produzione dei gate array è la CMOS, ma i produttori offrono dispositivi realizzati in tecnologia bipolare MOS e BiCMOS. Vengono prodotti anche gate array all'arseniuro di gallio, caratterizzati da bassi tempi di propagazione e da bassa dissipazione di potenza.

Le ***figure 10.11a, b*** mostrano la struttura tecnologica di un dispositivo BiCMOS e lo schema logico di una porta NAND a due ingressi. Questa serie di gate array è caratterizzata da elevate velocità, basso consumo di potenza ed elevata capacità di pilotaggio grazie ai transistor bipolari dello stadio di uscita. Questi dispositivi sono in grado di sostituire fino a 50 dispositivi a piccola e media scala di integrazione.

Figg. 10.11a, b:
a. struttura tecnologica di un dispositivo Bi-CMOS;
b. schema elettrico della porta logica NAND a due ingressi implementata nelle celle (*fonte*: Nec).



10.11a



10.11b

I contenitori impiegati per incapsulare i gate array sono di tipo plastico o ceramici a bassa resistenza, quali i pin *grid array* (▸ ***Figg. 10.12a-d***). I contenitori plastici più utilizzati sono i DIP plastici (da 24 a 64 terminali), i tipi flat (da 44 a 100 terminali), i **PPGA** (da 72 a 132 terminali) e i **PLCC** (da 28 a 84 terminali).

PPGA
– Plastic pin grid array
PLCC
– Plastic leaded chip carrier

Figg. 10.12a-d
Tipi di contenitore per PLD:
a. DIL;
b. PLCC;
c. PPGA;
d. flat.

10.12a DIL

10.12b PLCC

10.12c PPGA

10.12d flat

Celle standard

Con le celle standard il progetto del circuito integrato è affrontato da un punto di vista funzionale. Il progettista, avvalendosi di strumenti informatici sofisticati, progetta il circuito accedendo a librerie che contengono il modello funzionale e temporale del dispositivo reale, la rappresentazione standardizzata del layout e le procedure da impiegare per realizzare le maschere da usare nella produzione del componente. Nelle librerie sono elencati i dispositivi digitali (porte, multiplexer, decoder, sommatori, flip-flop, contatori, registri a scorrimento, ROM, RAM, ALU e microprocessori) e i componenti analogici (amplificatori operazionali, convertitori D/A e A/D) che il fabbricante è in grado di realizzare. Rispetto ai gate array, le macrocelle contenute nelle librerie consentono di realizzare dispositivi in cui la collocazione dei vari elementi circuitali è ottimizzata.

I programmi CAE utilizzati per lo sviluppo del progetto si avvalgono di sofisticati editor grafici che facilitano il posizionamento delle celle, la simulazione del corretto funzionamento del circuito e l'ottimizzazione delle prestazioni richieste, inoltre, alla fine del ciclo di progetto forniscono le maschere necessarie per la produzione del dispositivo.

La ***figura 10.13*** mostra una cella standard CMOS formata da 6000 porte, una memoria RAM da 4608 byte e una ROM da 128 Kbyte.

La ***figura 10.14*** mostra il diagramma di flusso standard utilizzato per produrre un gate array o una cella standard. Il progetto inizia con l'esatta e completa definizione delle specifiche del sistema da realizzare tenendo conto dei molteplici parametri tecnico-economici. Si decide quindi il tipo di implementazione (gate array o cella standard), cui seguono l'inserimento dello schema del circuito e la sua simulazione, il piazzamento e lo sbroglio delle interconnessioni, la generazione dei supporti magnetici e fisici (maschere) per la fabbricazione, la realizzazione e l'assemblaggio dei dispositivi e il loro incapsulamento. Si termina con la fase di collaudo e di test, cui può seguire una modifica del circuito per ovviare a errori o difetti; in loro assenza si procede all'avvio della produzione vera e propria.

Oltre che elementi digitali, i dispositivi ASIC possono contenere elementi analogici: in questo caso il dispositivo mantiene separati i due tipi di circuito posizionandoli in due aree differenti del chip e dotandoli di linee di alimentazione e di massa differenti (▸ ***Fig. 10.15***).

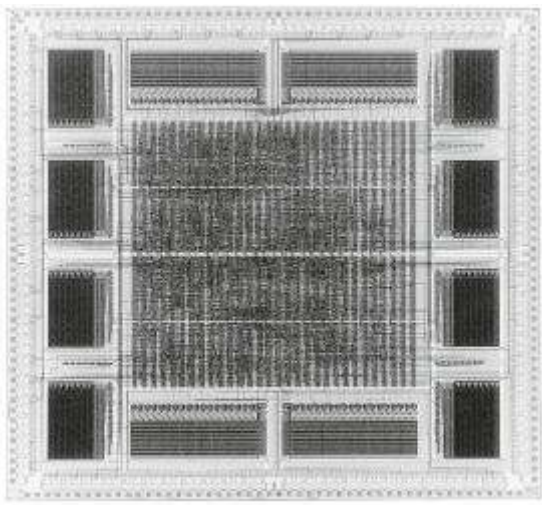


Fig. 10.13
Cella standard CMOS (*fonte*: Nec).

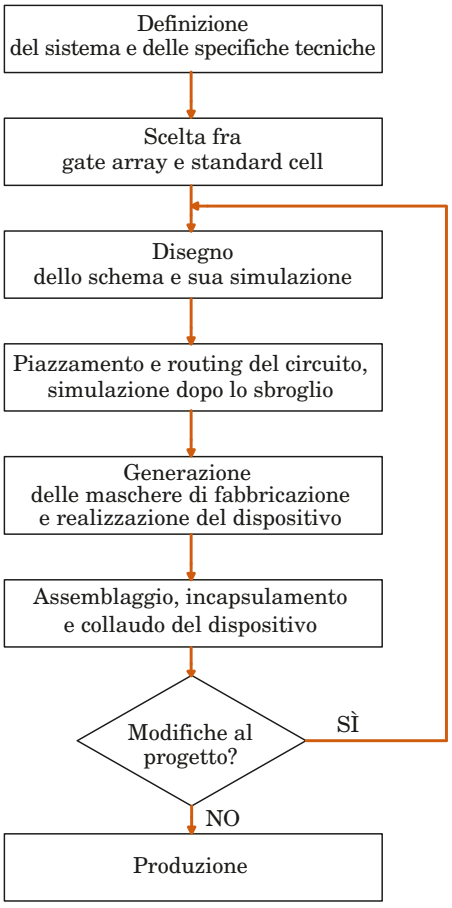


Fig. 10.14
Diagramma di flusso dei cicli di progetto e di realizzazione di un gate array o di una cella standard.

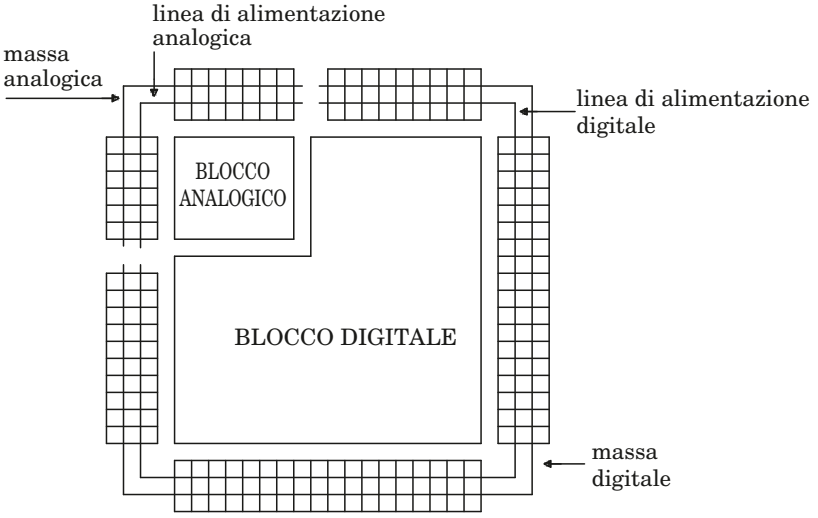


Fig. 10.15
Organizzazione di un gate array misto con circuiti analogici e digitali.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Qual è la particolarità costruttiva di un dispositivo GAL?
2. Quali vantaggi offre un dispositivo riprogrammabile?
3. Che cos'è un gate array?

CAP 11 PROGRAMMAZIONE DEI PLD

1 Software di programmazione
2 Linguaggi di programmazione
3 Simulazione di un PLD

Concetti chiave

- Equazioni booleane
- Equazioni indicizzate
- Mappa dei fusibili
- Mappe numeriche
- Stati macchina
- Stream

1 SOFTWARE DI PROGRAMMAZIONE

La programmazione dei dispositivi PLD descritti nel ***capitolo 10*** viene effettuata con specifici programmi che integrano quelli di simulazione e di verifica del funzionamento. Il pacchetto software OrCAD/PLD viene avviato attivando, dal menu principale, Programmable Logic Design Tools, oppure con uno dei tasti presenti nella sezione Transfer di tutte le altre applicazioni (▸ ***Fig. 11.1***). Il menu dell'applicazione (▸ ***Fig. 11.2***) contiene:

— la sezione **Editors**, comprendente i tasti che avviano i programmi che permettono di inserire le caratteristiche logiche del dispositivo in progetto;
— la sezione **Processors**, comprendente i tasti che attivano le procedure di compilazione e di verifica dei circuiti inseriti mediante la sezione Editors;
— la sezione **Transfers**, che attiva l'esecuzione delle altre applicazioni OrCAD;
— la sezione **User**, contenente tasti utilizzabili dall'utente per attivare altri programmi applicativi.

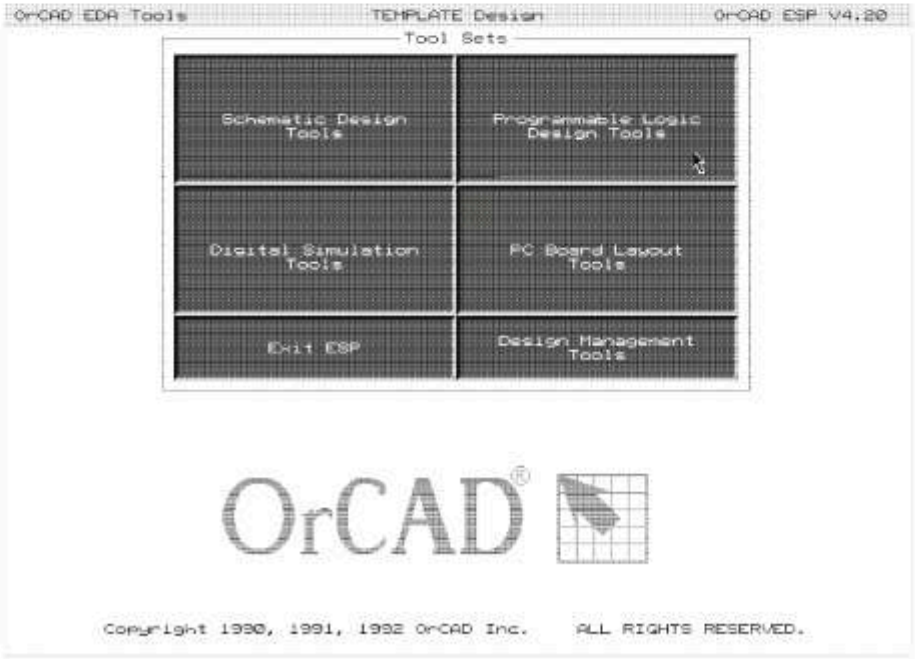


Fig. 11.1
Menu principale del programma OrCAD.

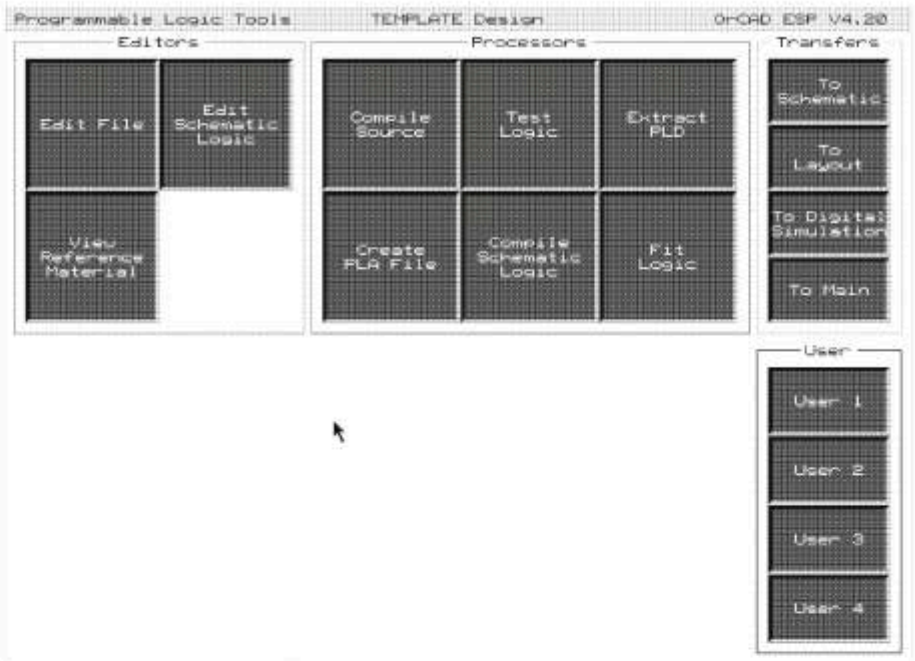


Fig. 11.2
Menu dell'applicazione OrCAD/PLD.

I circuiti elettronici da realizzare con un dispositivo PLD possono essere descritti con vari metodi.

- **Equazioni booleane** (*Boolean equations*). Il circuito elettronico è descritto scrivendo, con un qualsiasi programma di editor, le equazioni booleane del circuito desiderato; occorre rispettare le convenzioni mostrate nella ***tabella 11.1***. Successivamente si traducono e sintetizzano, con il compilatore PLD, le equazioni nella forma di somma di prodotti, preparando i file da utilizzare per la successiva elaborazione.

- **Equazioni indicizzate** (*indexed equations*). Questa forma di rappresentazione è usata per descrivere i componenti più complessi quali comparatori, decodificatori, contatori; tali dispositivi sono rappresentati come combinazione di circuiti logici fondamentali (porte, flip-flop).

- **Tabelle della verità** (*truth tables*, *streams*). Il circuito è descritto mediante la tabella della verità: sarà il programma compilatore a trasformare la tabella e a ridurla.

- **Stati macchina** (*machine states*). Questo metodo è utilizzato quando il circuito da realizzare è di tipo sequenziale e si può descriverlo mediante il diagramma degli stati di una macchina a stati finiti. Il linguaggio di programmazione rappresenta un automa di Mealy, e pertanto è possibile prevedere registri interni.

- **Schema logico** (*schematics*). Si disegna con un editor grafico lo schema del circuito che si vuole realizzare e successivamente, con opportune trasformazioni, si ottengono i file per la programmazione dei dispositivi PLD.

- **Mappe numeriche**.

Tabella 11.1 Operatori logici, aritmetici, di comparazione, hardware

OPERATORI LOGICI		OPERATORI ARITMETICI	
'	NOT	–	sottrazione
&	AND	*	moltiplicazione
#	OR	/	divisione
&'	NAND	\	resto della divisione
#'	NOR	**	esponenziale
##	OR - Esclusivo (EX-OR)		
##'	OR - Inclusivo (EX-NOR)		

OPERATORI DI COMPARAZIONE		OPERATORI HARDWARE	
= =	uguale a	??	abilita l'uscita a tre stati
/=	non uguale a	//	fronte di salita del segnale di clock
<	minore di	\\	fronte di discesa del segnale di clock
<=	minore o uguale di		
>	maggiore di		
>=	maggiore o uguale di		
+	addizione		

Lo schema della ***figura 11.3*** illustra la sequenza logica di programmazione da seguire per generare, con i vari metodi di editing descritti in precedenza, i file necessari per la programmazione dei PLD. Che si utilizzi una descrizione grafica o di testo, il compilatore PLD genera una serie di file caratterizzati dalle loro estensioni:

— **.LST**, contiene i risultati dell'elaborazione (sintesi delle equazioni, posizione dei segnali sui piedini del dispositivo PLD utilizzato, tabella dei fusibili da alterare);

— **.VEC**, contiene i riferimenti usati dal programma di utilità Vectors, che genera i segnali di test necessari per verificare, mediante simulazione, il corretto funzionamento del dispositivo;

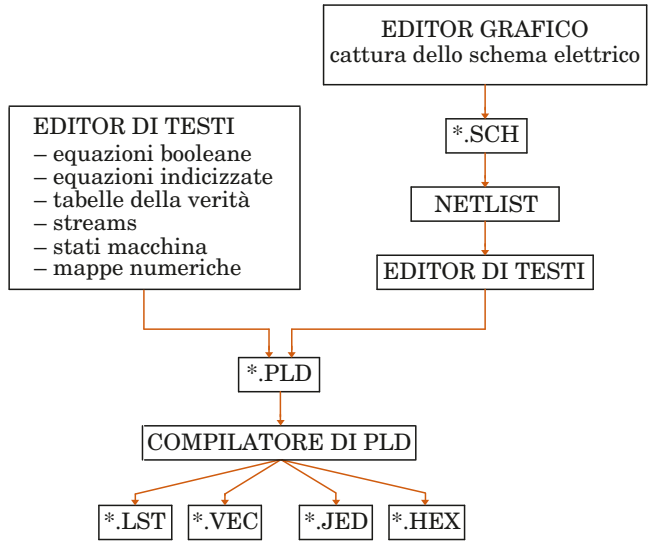


Fig. 11.3
Flusso di progetto di un dispositivo PLD.

JEDEC
– Joint electron device engineering council

— **.JED**, contiene la codifica JEDEC dei dati, una codificazione internazionale utilizzata dalle macchine programmatrici dei PLD;
— **.HEX**, contiene il codice in formato esadecimale da memorizzare in una PROM.

Dopo che il dispositivo è stato programmato, è necessario verificarne il corretto funzionamento mediante una serie di vettori di dati di ingresso che, applicati al modello del circuito, generano i corrispondenti segnali di uscita. Nel caso dei circuiti combinatori, i vettori di test possono essere, per i segnali scelti dal tecnico, generati automaticamente dal programma; nel caso dei circuiti sequenziali, invece, il tecnico deve intervenire in modo iterativo azzerando o settando i segnali di ingresso, mentre il tester logico elabora i vettori di test.

2 LINGUAGGI DI PROGRAMMAZIONE

Linguaggio booleano

Il linguaggio più semplice e universalmente utilizzato per programmare i PLD è quello basato sulle equazioni booleane. Il fatto che sia il più diffuso non implica che sia anche il migliore per affrontare qualsiasi problema, anzi, come vedremo in seguito presenta alcuni inconvenienti.

Le equazioni booleane impiegano i tre operatori fondamentali AND, OR, NOT che nel linguaggio sono codificati nel modo mostrato nella tabella 11.1.

I nomi assegnati ai segnali sono indicati con combinazioni di lettere (da *A* a *Z*) e di cifre (da 0 a 9): il primo carattere dev'essere una lettera (consigliamo di non usare nomi troppo lunghi). I numeri possono essere espressi in vari formati: decimale (14), binario (110b), ottale (16o) ed esadecimale (0Eh). Le cifre che in un numero rappresentato in notazione binaria, ottale o esadecimale assumono un valore di indifferenza (*don't care*) sono sostituite con il carattere X (per esempio 110XX0X01b).

Quando i segnali sono simili o rappresentano cifre (per esempio, le uscite di un multiplexer o di un contatore) è possibile rappresentarli in uno dei seguenti modi alternativi equivalenti (*in* e *out* indicano, rispettivamente, i segnali di ingresso e di uscita del circuito logico):

Con indici consecutivi_out:			
(Y1,Y2,Y3,Y4)	out: Y [1,2,3,4]	out: Y [1..4]	out: Y [1 ~ 4]
Con indici non consecutivi_in:			
(A1,A2,A5,A6,A7,B1,B2,B3)	in: (A [1..2, 5..7], B [1..3])		

Per mostrare la struttura di un programma sorgente di programmazione dei PLD utilizziamo il circuito di un addizionatore completo a due bit con riporto (*full adder*) illustrato nella ***figura 11.4***. L'esempio scelto è volutamente semplice e serve a focalizzare l'attenzione sulle modalità di impiego del programma e sulle tecniche di utilizzo dei PLD.

Un programma sorgente completo è formato da varie sezioni, alcune indispensabili altre opzionali:

1. **descrizione** (opzionale), contiene informazioni sul programma, su chi lo ha scritto e altre che si ritengono utili per la comprensione del programma;

2. **codice del dispositivo**, identifica il dispositivo PLD che si vuole utilizzare;
3. **segnali di ingresso e uscita**, vengono definiti mediante parole riservate:

— in segnali di ingresso;
— io segnali di uscita con controreazione (possono cioè essere usati come ingressi);
— out segnali di uscita;
— enable usato per abilitare un'uscita a tre stati posta all'interno del dispositivo;
— reset usato per forzare al livello logico basso i registri interni;
— preset usato per forzare al livello logico alto i registri interni;
— clock segnale di clock.

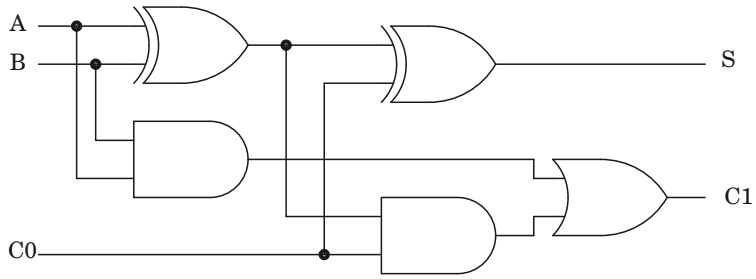


Fig. 11.4
Schema logico di un addizionatore completo.

INGRESSI			USCITE	
A	B	C0	S	C1
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

$$S = A \oplus B \oplus C0$$

$$C1 = A \cdot B + (A \oplus B) \cdot C0$$

4. **titolo**, assegna un nome al dispositivo che si realizza; non è obbligatorio ma è molto utile per caratterizzare il dispositivo in tutta la documentazione a esso collegata (schemi elettrici, liste dei componenti dei circuiti che lo utilizzano); la parola chiave è **Title**;
5. **stato dei segnali**, definisce quali segnali, di ingresso o di uscita, sono attivi bassi (parola chiave **Active-low**) e quali attivi alti (parola chiave **Active-high**); i segnali di ingresso e di uscita non caratterizzati con queste parole chiave sono considerati attivi alti; il livello logico attivo permette di individuare, fra i due stati possibili degli ingressi, quale determina un cambiamento, se previsto dalla funzione logica, delle uscite, e quale fra i due stati dell'uscita corrisponde a una modifica del suo stato normale;
6. **segnali condizionati**, definisce quali segnali di uscita hanno porte o registri a tre stati (*three-state*);
7. **tipo di riduzione**, si applica nella realizzazione della rete logica;
8. **configurazione del dispositivo**, la parola chiave è **Configuration** e ha lo scopo di espandere il programma PLD verso dispositivi non descritti nella presente versione del programma;

9. **descrizione del circuito** che si vuole realizzare in una delle forme accettate dal linguaggio (equazioni booleane, stati macchina, tabelle della verità, stream ecc.);
10. **comandi di test**, servono per effettuare sia la simulazione sia la generazione automatica dei vettori di test.

Il testo del programma (▸ ***Fig. 11.5***) può essere scritto con l'editor attivato con il tasto **Edit File** della sezione **Editors** del pacchetto OrCAD, o con un qualsiasi programma di editor (per esempio Blocco Note di Windows, salvando il file con l'estensione .PLD). Le prime righe sono un commento di intestazione del programma e descrivono in breve il circuito da realizzare.

Fig. 11.5
Programma sorgente per la programmazione del circuito addizionatore scritto con equazioni booleane.

```
        FULL - ADDER
    EQUAZIONI BOOLEANE
|  PAL16R6  in: (A, B, C0), out: (S, C1)
|
|  Title:   "FULL-ADDER"
|           "FA0197"
|
|    S  = (A ## B) ## C0
|    C1 = (A & B) # ((A##B) & C0)
```

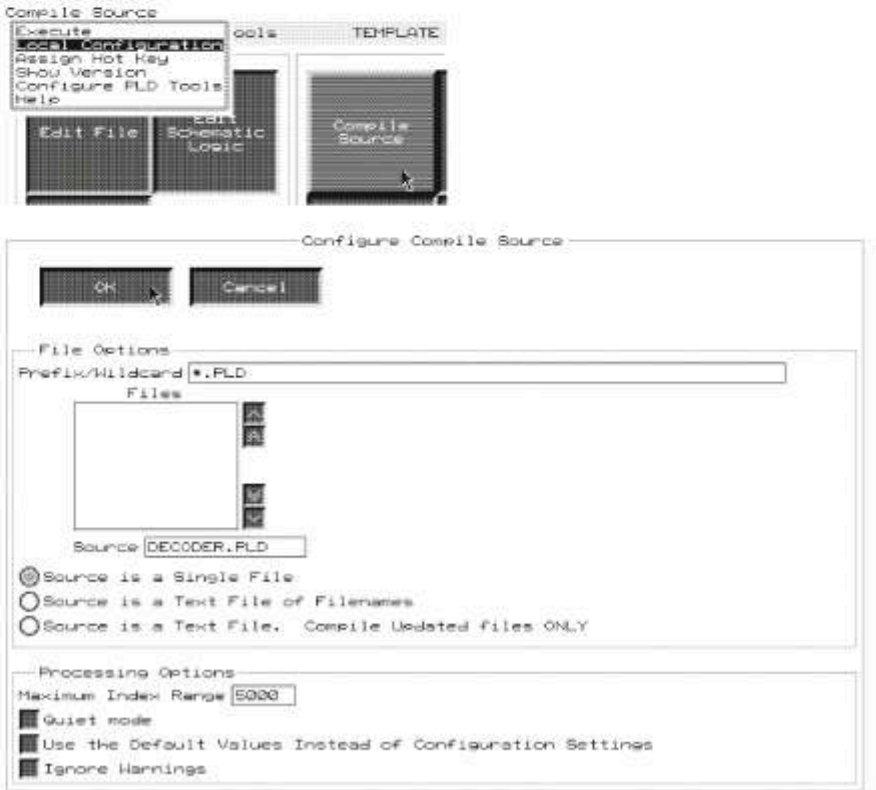
Le istruzioni, come richiesto dalla sintassi del linguaggio, iniziano sempre con una barra verticale (*pipe character* '|'); la prima istruzione identifica il dispositivo fisico da impiegare nella realizzazione del circuito, nell'esempio PAL16R6, e l'indicazione dei segnali di ingresso e di uscita; seguono le equazioni logiche booleane che risolvono il problema.

Il programma sorgente deve ora essere elaborato dal compilatore che provvede ad attribuire ai terminali del dispositivo i segnali di ingresso e di uscita e a trasformare le equazioni nella forma esplicita (somma di prodotti). La compilazione viene effettuata con il comando **Compile Source** dopo avere configurato il programma PLD (▸ ***Figg. 11.6*** e ***11.7***) e scritto il nome del file da compilare nella configurazione locale (▸ ***Fig. 11.8***).

Fig. 11.6
Menu di configurazione Configure PLD: ambiente operativo.

Fig. 11.7
Menu di configurazione Configure PLD: metodo di sintesi e riduzione dell'equazione logica.

Fig. 11.8
Menu di configurazione dell'opzione Compile Source.



Nel menu di configurazione dell'applicazione sono definiti:

— i percorsi di ricerca utilizzati dal programma per ricercare i modelli da impiegare per la realizzazione dei file di programmazione del PLD e per la simulazione del comportamento del dispositivo (**Destination Options** e **Library Options**);
— il modo di visualizzare le informazioni (**Screen Report Options**);
— la gestione della mappa dei fusibili (**Listing Options**);
— il metodo di sintesi da impiegare (**Synthesis Options**);
— il metodo di riduzione utilizzato (**Reduction Options**);
— i tipi di file che devono essere generati dall'elaborazione (.JED, .EXE, .PLA, .NET).

L'elaborazione del programma F-A.PLD, se priva di errori, genera il file f-a.lst (▸ ***Fig. 11.9***).

Nella prima parte dell'elaborazione è riproposto il testo del programma sorgente e nella seconda parte sono scritte, in forma tabellare, le due equazioni risolutive (*resolved expressions*) modificate dal programma nella forma esplicita di somma di prodotti:

$$S' = A' \cdot B' \cdot C0' + A' \cdot B \cdot C0' + A \cdot B' \cdot C0 + A \cdot B \cdot C0'$$

$$C' = A \cdot B + A' \cdot C0' + B' \cdot C0'$$

Fig. 11.9
File di progetto del circuito addizionatore generato dal programma di compilazione (file : f-a.lst).

```
OrCAD PLD COMPILER-386 V1.00  11/25/91  (Source file .\F-A.PLD)

 1
 2            FULL - ADDER
 3            EQUAZIONI BOOLEANE
 4    |   PAL16R6  in:(A, B, C0), out:(S, C1)
 5    |
 6    |   Title: "FULL-ADDER"
 7    |            "FA0197"
 8    |
 9    |       S  = (A ## B) ## C0
10    |       C1 = (A & B) # ((A##B) & C0)
11

RESOLVED EXPRESSIONS (Reduction 2)

Signal name      Rows      Terms

S'                 8       A' B' C0'
                   9       A' B  C0
                  10       A  B' C0
                  11       A  B  C0'

C1'               16       A' B'
                  17       A' C0'
                  18       B' C0'
```

SIGNAL ASSIGNMENT

Pin	Signal name	Column	Rows Beg	Rows Avail	Rows Used	Activity	
2.	A	0	–	–	–	High	
3.	B	4	–	–	–	High	
4.	C0	8	–	–	–	High	
5.	–	12	–	–	–		
6.	–	16	–	–	–		
7.	–	20	–	–	–		
8.	–	24	–	–	–		
9.	–	28	–	–	–		
12.	–	30	56	8	0		(Three-state)
13.	–	26	48	8	0		(Registered)
14.	–	22	40	8	0		(Registered)
15.	–	18	32	8	0		(Registered)
16.	–	14	24	8	0		(Registered)
17.	C1	10	16	8	3	High	(Registered)
18.	S	6	8	8	4	High	(Registered)
19.	–	2	0	8	0		(Three-state)
				64	7	(11%)	

I200 No fatal errors found in source code.
I201 No warnings.

FUSE MAP FOR PAL16R6

	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
0	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
1	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
2	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
3	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
4	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
5	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
6	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
7	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
8	-x	–	-x	–	-x	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
9	-x	–	x-	–	x-	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
10	x-	–	-x	–	x-	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
11	x-	–	x-	–	-x	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
12	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
13	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
14	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
15	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
16	-x	–	-x	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
17	-x	–	–	–	-x	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
18	–	–	-x	–	-x	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	– –
19	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx

20	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
21	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
22	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
23	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
24	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
25	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
26	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
27	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
28	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
29	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
30	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
31	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
32	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
33	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
34	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
35	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
36	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
37	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
38	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
39	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
40	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
41	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
42	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
43	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
44	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
45	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
46	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
47	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
48	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
49	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
50	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
51	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
52	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
53	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
54	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
55	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
56	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
57	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
58	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
59	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
60	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
61	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
62	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
63	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx

Legend: x fuse intact
- fuse open

206 fuses open of 2048 total.

```
OrCAD PLD-386
Type:      PAL16R6
Title:     FULL-ADDER
           FA0197
*
QP20* QF2048* QV1024*
F0*
L0256  10  11  10  11  10  11  11  11  11  11  11  11  11  11  11  11  *
L0288  10  11  01  11  01  11  11  11  11  11  11  11  11  11  11  11  *
L0320  01  11  10  11  01  11  11  11  11  11  11  11  11  11  11  11  *
L0352  01  11  01  11  10  11  11  11  11  11  11  11  11  11  11  11  *
L0512  10  11  10  11  11  11  11  11  11  11  11  11  11  11  11  11  *
L0544  10  11  11  11  10  11  11  11  11  11  11  11  11  11  11  11  *
L0576  11  11  10  11  10  11  11  11  11  11  11  11  11  11  11  11  *
C1B30*

I202   6/4/97  4:20 pm  (Wednesday)
I203   Memory usage 16K
I204   Elapsed time 1 second
```

Le equazioni ottenute sono identiche a quelle inserite, come si può dimostrare ricavando la tabella della verità delle due equazioni o applicando il teorema di De Morgan (è un esercizio utile). La parte successiva della tabella (*signal assignment*) mostra a quali pin del dispositivo sono stati assegnati i segnali di ingresso e di uscita.

La sezione FUSE MAP mostra quali fusibili dovrebbero essere fusi per ottenere con la PAL prescelta il dispositivo desiderato. All'uscita S sono state assegnate le righe 8, 9, 10, 11 (vedi la sezione delle equazioni risolutive); i segnali di ingresso sono invece applicati alle colonne 0 (A), 4 (B) e 8 (C0), dove la prima colonna indica il valore vero e l'altra quello complementato; incrociando righe e colonne si nota che i fusibili interrotti sono correttamente inseriti al fine di ottenere le equazioni desiderate.

L'ultima sezione mostra la codifica in formato JEDEC che, trasmessa o copiata in un programmatore di PAL/EPROM, viene utilizzata per fondere le giunzioni del dispositivo fisico.

Equazioni indicizzate

Le equazioni booleane possono essere talvolta scritte in modo più sintetico ricorrendo alla forma indicizzata (▸ ***Tab. 11.2***).

Tabella 11.2 Formato indicizzato delle equazioni

FORMATO NORMALE	FORMATO INDICIZZATO
Y1 Y2 Y3	Y [1..3]

Y1 = A1 # B1
Y2 = A2 # B2
Y3 = A3 # B3
	Y[1..3] = A[1..3] # B[1..3]
	formato alternativo:
	i = 1..3 : Y[i] = A[i] # B[i]

I segnali sono identificati con un nome collettivo e distinti mediante un indice racchiuso fra parentesi quadre. Se si considerano più bit è possibile indicarne il campo di variazione con i due valori estremi separati da due punti.

La ***figura 11.10*** mostra il file di progetto ottenuto dalla compilazione del programma sorgente di un decodificatore da 4 a 16, scritto con un'equazione indicizzata.

Fig. 11.10
Programma sorgente per la programmazione di un decodificatore da 4 a 16 scritto con la equazioni indicizzate (file: f-dec.pld).

OrCAD PLD COMPILER-386 V1.00 11/25/91 (Source file .\DEC4-10.PLD)

```

Decoder da 4 a 10
EQUAZIONI INDICIZZATE
|PAL12H10  in:A[3..0], out:Q [9..0]
|
|   Title:   "DECODER DA 4 A 10"
|            "FA0397"
|
|            n=0..9: Q[n]=A[3..0] == n

```

RESOLVED EXPRESSIONS (Reduction 2)

Signal name	Rows	Terms
Q0	18	A3' A2' A1' A0'
Q1	16	A3' A2' A1' A0
Q2	14	A3' A2' A1 A0'
Q3	12	A3' A2' A1 A0
Q4	10	A3' A2 A1' A0'
Q5	8	A3' A2 A1' A0
Q6	6	A3' A2 A1 A0'
Q7	4	A3' A2 A1 A0
Q8	2	A3 A2' A1' A0'
Q9	0	A3 A2' A1' A0

SIGNAL ASSIGNMENT

Pin	Signal name	Column	Rows			Activity
			Beg	Avail	Used	
1.	A3	2	–	–	–	High
2.	A2	0	–	–	–	High
3.	A1	4	–	–	–	High
4.	A0	6	–	–	–	High
5.	–	8	–	–	–	
6.	–	10	–	–	–	
7.	–	12	–	–	–	

8.	–	14	–	–	–	
9.	–	16	–	–	–	
10.	–	18	–	–	–	
11.	–	20	–	–	–	
13.	–	22	–	–	–	
14.	Q0	–	18	2	1	High
15.	Q1	–	16	2	1	High
16.	Q2	–	14	2	1	High
17.	Q3	–	12	2	1	High
18.	Q4	–	10	2	1	High
19.	Q5	–	8	2	1	High
20.	Q6	–	6	2	1	High
21.	Q7	–	4	2	1	High
22.	Q8	–	2	2	1	High
23.	Q9	–	0	2	1	High
				20	10	(50%)

I200 No fatal errors found in source code.
I201 No warnings.

FUSE MAP FOR PAL12H10

	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
0	-x	x-	-x	x-	–	–	–	–	–	–	–	–
1	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
2	-x	x-	-x	-x	–	–	–	–	–	–	–	–
3	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
4	x-	-x	x-	x-	–	–	–	–	–	–	–	–
5	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
6	x-	-x	x-	-x	–	–	–	–	–	–	–	–
7	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
8	x-	-x	-x	x-	–	–	–	–	–	–	–	–
9	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
10	x-	-x	-x	-x	–	–	–	–	–	–	–	–
11	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
12	-x	-x	x-	x-	–	–	–	–	–	–	–	–
13	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
14	-x	-x	x-	-x	–	–	–	–	–	–	–	–
15	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
16	-x	-x	-x	x-	–	–	–	–	–	–	–	–
17	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
18	-x	-x	-x	-x	–	–	–	–	–	–	–	–
19	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx

Legend: x fuse intact
- fuse open

200 fuses open of 480 total.

```
OrCAD PLD-386
Type:      PAL12H10
Title:     DECODER DA 4 A 10
           FA0397
*
QP24* QF480* QV1024*
F0*
L000   10  01  10  01  11  11  11  11  11  11  11  11  *
L048   10  01  10  10  11  11  11  11  11  11  11  11  *
L096   01  10  01  01  11  11  11  11  11  11  11  11  *
L144   01  10  01  10  11  11  11  11  11  11  11  11  *
L192   01  10  10  01  11  11  11  11  11  11  11  11  *
L240   01  10  10  10  11  11  11  11  11  11  11  11  *
L288   10  10  01  01  11  11  11  11  11  11  11  11  *
L336   10  10  01  10  11  11  11  11  11  11  11  11  *
L384   10  10  10  01  11  11  11  11  11  11  11  11  *
L432   10  10  10  10  11  11  11  11  11  11  11  11  *
C18CA*

I202  6/5/97  6:26 pm  (Thursday)
I203  Memory usage 12K
I204  Elapsed time 1 second
```

Il file sorgente è compilato nello stesso modo descritto in precedenza, con il comando **Compile Source**: si ottiene un file identico, nella sua struttura, a quello precedente, salvo che nella parte relativa al file sorgente .PLD.

Le equazioni indicizzate sono particolarmente utili per descrivere i circuiti combinatori (decodificatori, multiplexer) e sequenziali (contatori, registri a scorrimento ecc.).

I codici operativi e funzionali usati per codificare, nelle equazioni dei flip-flop, il fronte attivo del segnale di clock e il funzionamento sincrono o asincrono degli ingressi, sono mostrati nella ***tabella 11.3***.

Tabella 11.3 Codifica delle tabelle

D FLIP-FLOP

//	fronte di salita del segnale di clock controllo sincrono	! Y = clock // dato esempio:	! Y = CLK // (A & B)
\\	fronte di discesa del segnale di clock controllo sincrono	! Y = clock \\ dato esempio:	! Y = CLK \\ (A & B)
dff	controllo sincrono controllo asincrono	! Y = dff (dato,clock) ! Y = dff (dato, clock, reset asincrono, set asincrono)	

T FLIP-FLOP

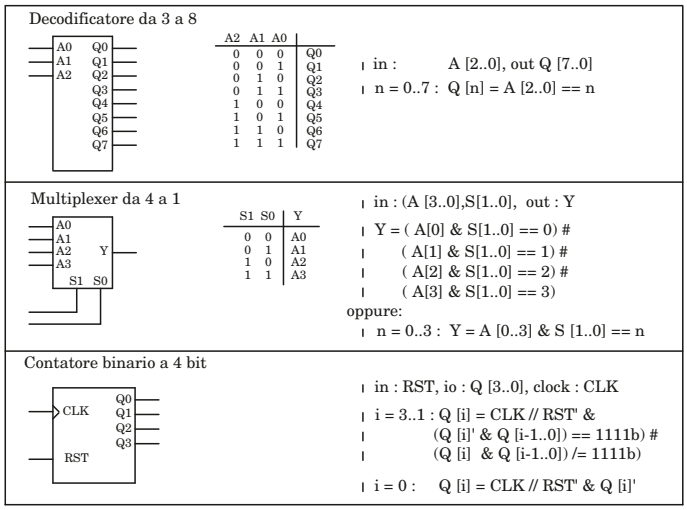
tff	controllo sincrono	! y = tff (dato, clock)
ff	flip-flop generico il compilatore sceglie quello più adatto fra il tipo T e quello D	

Nota Clock, dato, reset e set asincrono possono essere sia segnali sia espressioni.

La ***figura 11.11*** fornisce alcuni esempi di codifica dei componenti combinatori e sequenziali. L'interpretazione delle equazioni è la seguente.

— Decodificatore da 3 a 8: l'uscita *n*-esima del decodificatore è al livello logico alto quando all'ingresso è presente il numero binario corrispondente; la variabile *n* può assumere tutti gli otto valori possibili degli ingressi A[0..7], mentre l'uscita attiva alta è quella per la quale il dato in ingresso è pari a un valore dell'indice fra quelli possibili.

Fig. 11.11
Codifica di dispositivi complessi mediante equazioni indicizzate.



— Multiplexer da 4 a 1: l'uscita corrisponde al valore del segnale di ingresso A scelto fra uno dei quattro decodificabili dai segnali di ingresso S[1..0]; nella tabella sono proposte sia le equazioni con indici sia quelle senza.

— Contatore binario a 4 bit: il bit meno significativo del contatore Q[0] commuta a ogni transizione sul fronte positivo del segnale di clock se il segnale di reset RST non è attivo (livello logico basso); le altre uscite commutano, in presenza del segnale di clock, soltanto se l'uscita attuale è al livello logico basso e le precedenti sono tutte al livello logico alto, oppure se l'uscita attuale è al livello logico alto e le precedenti non sono tutte al livello logico alto; la giustificazione delle equazioni si può ricavare dall'analisi della tabella della verità.

La ***tabella 11.4*** mostra un altro metodo per codificare le equazioni che descrivono, mediante operatori aritmetici, un contatore a quattro cifre

Tabella 11.4 Codifica di un contatore binario

CONTATORE A 4 CIFRE BINARIE

Q[3..0] =CLK // Q[3..0] + 1	incrementa sul fronte di salita del segnale di CLK
Q[3..0] =CLK // RESET' & (Q[3..0] + 1)	resetta il contatore se RESET =1
Q[3..0] =CLK // (LOAD' & (Q[3..0] + 1)) # (LOAD & D[3..0])	presetta il contatore al valore D[3..0] quando LOAD = 1 e conta quando LOAD = 0

Il modulo del contatore può essere incrementato modificando il campo di variazione degli indici (Q[7..0]). Anche il passo di incremento può essere variato sia in incremento sia in decremento (..., +3, +2, -1, -2, ...)

binarie: la prima equazione descrive un contatore che possiede il solo ingresso di clock, la seconda un contatore con un ingresso di reset sincrono e la terza un contatore con l'ingresso di reset e di preset sincroni.

Tabelle della verità

La descrizione di un circuito può essere inserita nel file sorgente .PLD, invece che con le equazioni booleane, ricorrendo direttamente alla tabella della verità mediante la parola chiave del linguaggio **Table** (▸ ***Tab. 11.5***).

Tabella 11.5 Descrizione del circuito mediante tabelle della verità

TABELLA DELLA VERITÀ				CODIFICA DELLE TABELLE			
				BINARIO		DECIMALE	
A	B	C0	S	Table: A,B,C0 –> S	Table: A,B,C0 –> S	Table: A,B,C0 –> S	Table: A,B,C0 –> S
0	0	0	0	{000b –> 0	{00Xb –> 0	{0 –> 0	{0,3,5..6 –> 0
0	0	1	1	001b –> 0	010b –> 0	1 –> 1	1..2, 7 –> 1}
0	1	0	1	010b –> 0	011b –> 1	2 –> 1	
0	1	1	0	011b –> 1	100b –> 1	3 –> 0	
1	0	0	1	100b –> 1	101b –> 0	4 –> 1	
1	0	1	0	101b –> 0	110b –> 0	5 –> 0	
1	1	0	0	110b –> 0	111b –> 1}	6 –> 0	
1	1	1	1	111b –> 1}	7 –> 1}		

La ***figura 11.12*** mostra il programma sorgente del circuito addizionatore scritto con questo sistema. Il file sorgente viene compilato, come abbiamo descritto, prima con il comando **Compile Source**: si ottiene un file identico al precedente salvo che nella parte relativa al file sorgente .PLD.

Fig. 11.12
Programma sorgente per la programmazione del circuito addizionatore scritto con la tabella della verità (file: f-atv.pld).

```
        FULL - ADDER
        TABELLA DELLA VERITÀ

| PAL16R6  in: (A, B, C0), out:(S, C1)
|
| Title:   "FULL-ADDER"
|          "FA0197"
|
|    Table:  A, B, C0 –> S
|    {0                –> 0
|     1..2             –> 1
|     3                –> 0
|     4                –> 1
|     5..6             –> 0
|     7                –> 1
|     }
|    Table:  A, B, C0 –> C1
|    {0..2             –> 0
|     3                –> 1
|     4                –> 0
|     5..7             –> 1
|    }
```

Schema logico

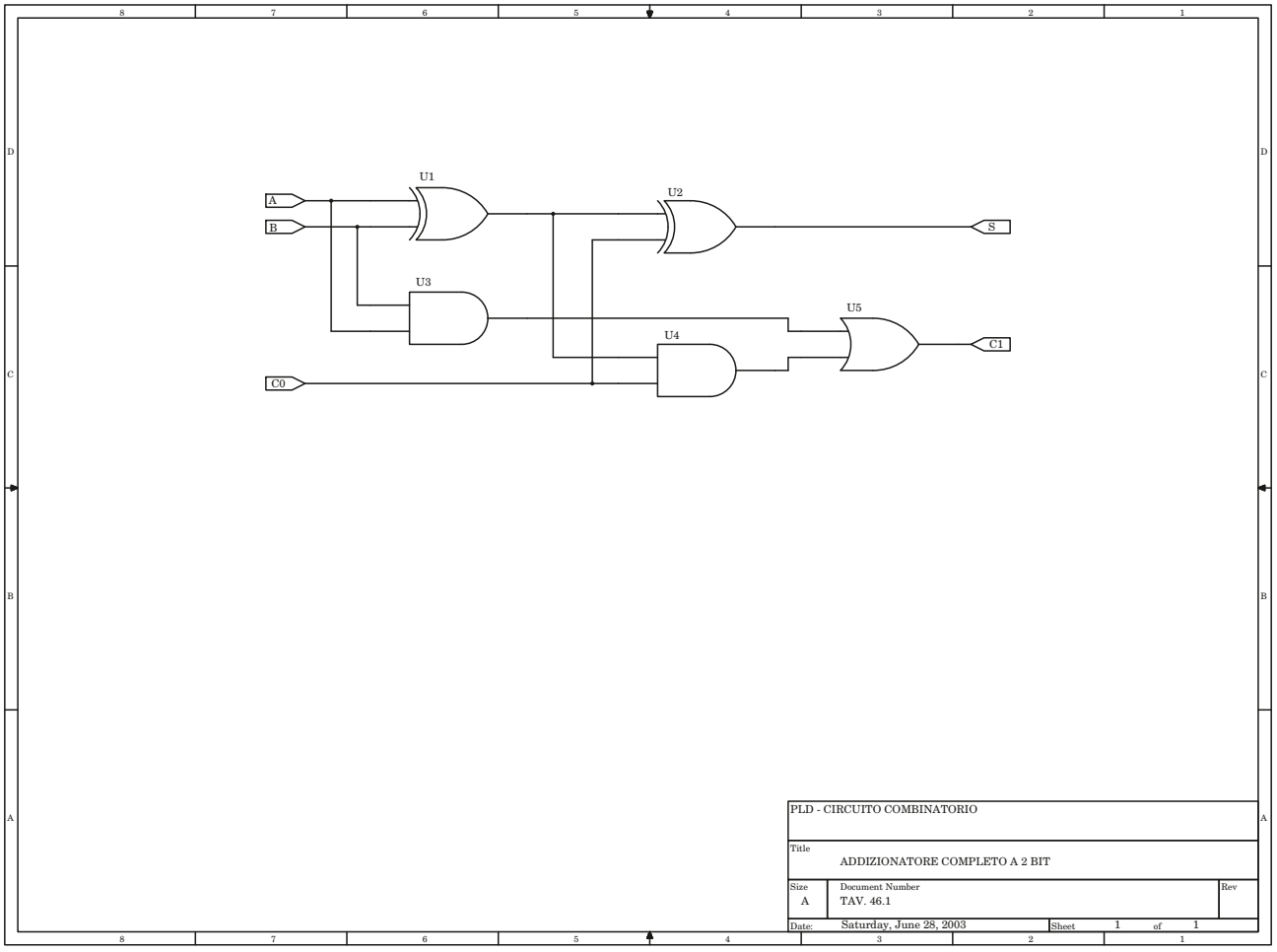
Il disegno del circuito dev'essere eseguito con il programma di editor grafico DRAFT. È possibile usare le normali librerie impiegate per la realizzazione dei disegni, anche se è consigliabile utilizzare quelle della libreria PLDGATES.LIB i cui simboli sono sicuramente compatibili con il programma PLD.

Una volta disegnato lo schema (▸ ***Tav. 11.1***), bisogna trasformarlo in una rappresentazione interpretabile dal programma PLD generando una netlist dello schema nel formato PLDDEV con il comando **Edit Netlist** del menu Schematic Design Tools o il comando **Compile Schematic Logic** del PLD Tools.

La ***figura 11.13*** mostra il menu di configurazione che permette di ottenere la netlist nel formato corretto; il testo viene poi inserito nel programma sorgente PLD come mostrato nella ***figura 11.14***.

Il file sorgente è compilato nello stesso modo descritto in precedenza mediante il comando **Compile Source**: si ottiene un file perfettamente identico al precedente salvo che nella parte relativa al file sorgente .PLD.

TAVOLA 11.1 Addizionatore completo a due bit: PLD, circuito combinatorio.



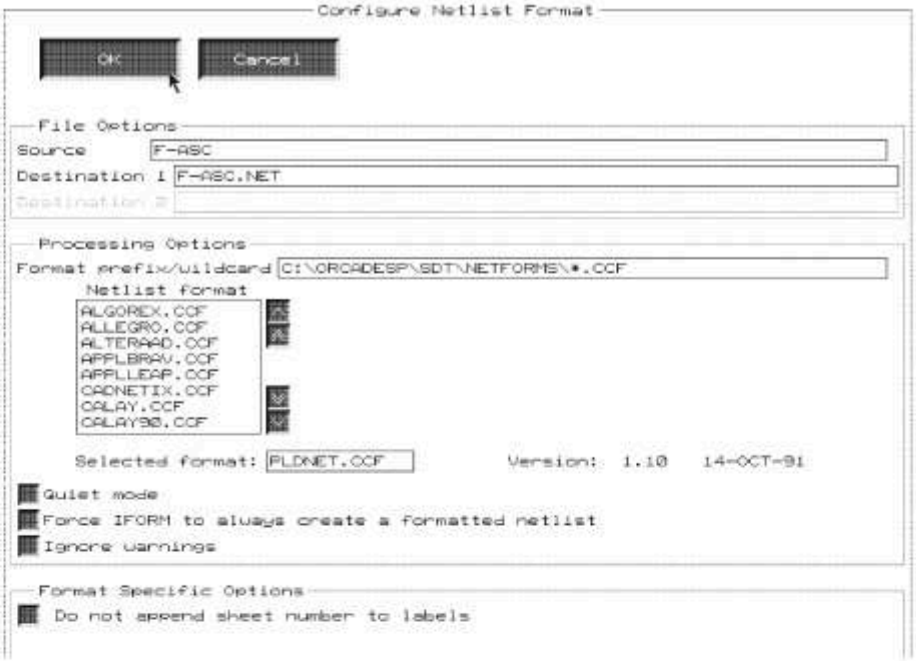


Fig. 11.13
Menu di configurazione Create Netlist: Configure Netlist Format.

```
ADDIZIONATORE COMPLETO A 2 BIT                    Revised:   June 28, 2003
TAV. 46.1                                         Revision:
PLD - CIRCUITO COMBINATORIO

| PAL16R6  in:(A, B, C0), out:(S, C1)
|
| Title: "FULL-ADDER"
|        "FA0197"
|
| Netlist:          A,B,C0
|                   –>
|                   S,C1
|  {
|  AND2 (N00002,B,A)  | U3
|  AND2 (N00003,N00001,C0)  | U4
|  OR2 (C1,N00002,N00003)  | U5
|  XOR2 (N00001,A,B)  | U1
|  XOR2 (S,N00001,C0)  | U2
|  }
```

Fig. 11.14
Programma sorgente per la programmazione del circuito addizionatore ricavato dallo schema elettrico (file: f-asc.pld).

Flussi di dati

Nelle tabelle della verità il valore dei segnali di ingresso è posto in relazione con un corrispondente valore dell'uscita. In un flusso di dati (*stream*) i valori di ingresso sono impliciti e vengono quindi elencati, in sequenza, i soli valori di uscita.

La ***tabella 11.6*** mostra come si codificano, in un programma sorgente, i dati di una tabella della verità: nella prima colonna appare la tabella

della verità vera e propria, nella seconda la sua codifica mediante la parola chiave **Table** e nella terza la codifica, compatta ed efficace, ottenibile con la parola chiave **Stream**. La codifica con quest'ultima parola chiave può essere resa ancora più rapida ed efficace con gli altri due metodi di codifica alternativi che permettono di non duplicare termini consecutivi uguali fra loro.

Tabella 11.6 Descrizione del circuito mediante stream

TABELLA DELLA VERITÀ

S2	S1	S0	Y
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

```
Table : S2,S1,S0 –> Y
{ 0              –> 0
  1..2           –> 1
  3              –> 0
  4              –> 1
  5..6           –> 0
  7              –> 1
  }
```

STREAM

```
stream :  S [2..0] –>Y
{0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1}

forme alternative:
stream :  S [2..0] –>Y
{0, 2 (1), 0, 1, 2 (0), 1}

stream :  S [2..0] –>Y
{0, 1, 2(1, 0), 0, 1}
```

La ***figura 11.15*** mostra il file sorgente PLD che utilizza la parola chiave **Stream** per realizzare l'addizionatore completo; la compilazione del file sorgente genera file perfettamente identici ai precedenti.

Fig. 11.15
Programma sorgente per la programmazione del circuito addizionatore descritto mediante la funzione Stream.

```
        FULL - ADDER
        TABELLA DELLA VERITA'

| PAL16R6  in:(A, B, C0), out:(S, C1)
|
| Title: "FULL-ADDER"
|        "FA0197"
|
|     Stream:  A, B, C0 –> S
|     {0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1}
|
|     Stream:  A, B, C0 –> C1
|     {0, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1}
```

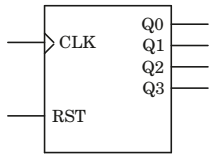
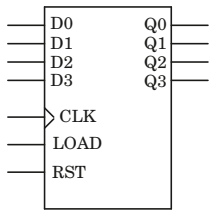
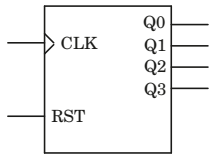
Mappe numeriche

Un metodo sintetico per rappresentare i contatori è quello basato sull'uso della parola chiave **Map** (▸ ***Fig. 11.16***).

L'istruzione è molto semplice: si indica quali sono le uscite e gli ingressi coinvolti nel processo di creazione della mappa e la regola da utilizzare. Nel primo esempio la mappa viene creata aggiungendo al valore precedentemente assunto dalle uscite Q[3..0] un 1 se l'ingresso di reset non è attivo, e ponendo invece a 0 tutte le uscite se l'ingresso di reset è attivo. Gli altri esempi vanno interpretati allo stesso modo.

Fig. 11.16
Descrizione del circuito mediante mappe numeriche.

map: Q [3..0] –> Q [3..0] {n –> n+1}

	segnale di ingresso	segnale di uscita	regola
Contatore binario a 4 cifre			
	in : RST,	io : Q [3..0],	clock : CLK
	map: Q [3..0] –> Q [3..0]		
	{ n –> n+1, RST'		
	n –> 0, RST }		
Contatore binario a 4 cifre con ingressi di reset e load sincroni			
	in : RST,	io : Q [3..0],	clock : CLK
	map: Q [3..0] –> Q [3..0]		
	{ n –> n+1, RST' & LOAD'		
	n –> D [3..0], RST' & LOAD		
	n –> 0, RST }		
Contatore BCD a 1 cifra			
	in : RST,	io : Q [3..0],	clock : CLK
	map: Q [3..0] –> Q [3..0]		
	{ n –> n+1, n < 9 & RST'		
	n –> 0, n > = 9 & RST }		

Stati macchina

La programmazione degli stati macchina è eseguita con un linguaggio procedurale simile a un linguaggio software ad alto livello comprendente etichette (*label*), istruzioni di controllo del flusso dei dati (*if... then... else*), salti (*go to*).

La ***figura 11.17*** fornisce un esempio di codifica di una tabella degli stati. La parola chiave **Conditioning** stabilisce la condizione logica che determina la transizione fra gli stati; nell'esempio, la transizione deve avvenire quando il segnale di ingresso CLK commuta dal livello logico basso a quello alto (transizione sul fronte positivo).

La parola chiave che introduce la tabella degli stati è **Procedure**; i segnali RST e Q[2..0] rappresentano le condizioni che consentono la transizione. Gli stati sono indicati su due colonne: a sinistra quello attuale, a destra quello successivo alla transizione, che viene indicata da una freccia formata da un trattino e dal segno di maggiore. Gli stati possono essere inseriti nella tabella secondo un ordine qualsiasi.

Per spiegare in modo rapido e chiaro come si codifica una macchina a stati finiti proponiamo, nell'esempio che presentiamo di seguito, un problema di automazione.

Fig. 11.17
Descrizione del circuito mediante il diagramma degli stati.

```
SEQUENZA DEL CONTEGGIO
0 –> 7 –> 2 –> 6 –> 5 –> 3 –> 4–> 1 –> 0

| PAL16R8 in: RST, out: Q[2..0], clock: CLK
|
| Title: "SEQUENZA NUMERICA"
|
| Conditioning: CLK // Q[2..0]
|
| Procedure:  RST, Q[2..0]
| { 0. –> 7
|   7. –> 2
|   2. –> 3
|   6. –> 5
|   5. –> 3
|   3. –> 4
|   4. –> 1
|   1. –> 0 }
```

ESEMPIO

CODIFICA DI UNA MACCHINA A STATI FINITI

Il problema riguarda la sequenza di accensione e di spegnimento di tre pompe.

Un impianto è formato da tre pompe (A, B, C) la cui accensione è controllata da tre segnali di controllo (PA, PB, PC) secondo le seguenti regole:

— all'accensione, e quando i segnali di controllo sono inattivi, le tre pompe sono spente in stato di attesa;
— se si attiva il solo segnale PA si attiva la pompa A;
— se si attiva il segnale PB la pompa B si attiva solo se è attivo il segnale PA e non il segnale PC;
— se si attiva il segnale PC la pompa C si attiva solo se è attivo il segnale PA e non il segnale PB;
— se si disattiva il segnala PA si spengono tutte le pompe;
— se si disattiva il segnale PB si disattiva la sola pompa B;
— se si disattiva il segnale PC si disattiva la sola pompa C.

Il sistema presenta quindi quattro stati.

1. Stato 0 di attesa (*waiting state*): tutte e tre le pompe sono ferme.
2. Stato 1: è attiva la pompa A.
3. Stato 2: è attiva la pompa B.
4. Stato 3: è attiva la pompa C.

La ***figura 11.18*** mostra il diagramma degli stati.

In questo esempio, la condizione di transizione non dipende più soltanto dal segnale di clock, ma anche dallo stato dei segnali di ingresso PA, PB e PC; il trasferimento dallo stato 0 allo stato 2 viene codificato nel seguente modo:

```
0.      PB & PA & PC'      ?      –> 2
```

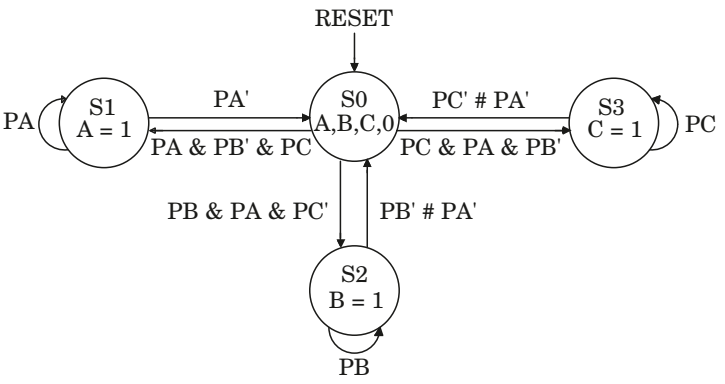


Fig. 11.18
Diagramma degli stati del sistema di pompe.

La transizione dallo stato 0 allo stato 2 avviene se i segnali PB e PA sono attivi e il segnale PC è inattivo.

La ***figura 11.19*** mostra il programma sorgente che codifica il diagramma degli stati proposto. Osserviamo che i segnali di uscita A, B e C non vengono disattivati in quanto sono posti al livello logico basso dalla procedura stessa. Il programma (nella forma procedurale) viene interpretato dal compilatore di PLD secondo l'ordine delle istruzioni dall'alto verso il basso e da sinistra verso destra; quando la condizione imposta è soddisfatta, la transizione si compie senza ulteriori elaborazioni.

Fig. 11.19
Programma sorgente per la programmazione del PLD per il pilotaggio del sistema di pompe.

```
            CONTROLLI DI UN SISTEMA DI POMPE
                    STATI MACCHINA
| PAL16R6  in: (RESET,PA,PB,PC), out: (A,B,C,Q[2..0]), clock: CLOCK
|
| Title: "CONTROLLO DI UN SISTEMA DI POMPE"
|        "FA0297"
|
| Procedure:  RESET,Q[2..0]
| {
|     0.  PA & PB' & PC'?   –>  1
|         PB & PA & PC' ?   –>  2
|         PC & PA & PB' ?   –>  3
|         –> 0
|
|     1.  A=1
|         PA  ?             –>  1
|         PA' ?             –>  0
|
|     2.  B=1
|         PB  ?             –>  2
|         PB'# PA' ?        –>  0
|
|     3.  C=1
|         PC  ?             –>  3
|         PC'# PA' ?        –>  0
| }
```

La ***tabella 11.7*** elenca due diverse codificazioni della stessa parte della tabella delle transizioni.

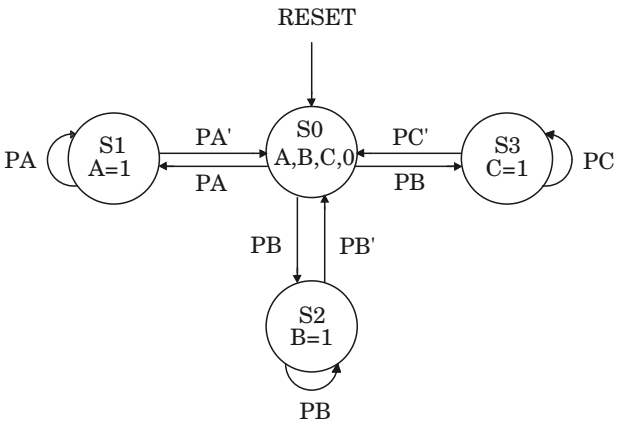
Tabella 11.7 Metodi di codifica delle transizioni

0.	PA	? > 1	0.	PA	? –> 1
	PB & PA′	? > 2		PB	? –> 2
	PC & PB′ & PA′	? > 3		PC	? –> 3
	PA′ & PB′ & PC′	? > 0			? –> 0

I codici riportati nella seconda riga delle due colonne sono equivalenti perché entrambi provocano la transizione di stato quando viene applicato il fronte attivo del segnale di clock; infatti, facendo riferimento alla regola seguita dal compilatore nell'interpretazione dei codici si deduce che il codice della seconda riga viene eseguito solo se il segnale di ingresso era complementato (PA′); il codice della terza riga viene eseguito solo se i precedenti non si sono attivati, e ciò avviene solo se i segnali PA e PB sono complementati; nella quarta riga la transizione allo stato 0 avviene in quanto nessun segnale di ingresso è attivo. L'ordine in cui le transizioni sono indicate nel programma determina quindi anche l'ordine di priorità con cui vengono eseguite.

Appare evidente che il secondo metodo di codifica è migliore in quanto più compatto, presenta però l'inconveniente di richiedere una particolare attenzione da parte del tecnico programmatore nel selezionare la corretta sequenza degli stati.

La ***figura 11.20*** mostra un esempio di programma sorgente basato su una codifica del diagramma degli stati che sfrutta il metodo di compilazione del compilatore di PLD.




```
PAL16R6  in: (RESET,PA;PB;PC),
out (A,B,C,Q[2..0]), clock: CLOCK

Procedure: RESET, Q[2..0]
{   0.  PA ? –> 1
        PB ? –> 2
        PC ? –> 2

    1.  A=1
        PA ? –> 1
             –> 0

    2.  B=1
        PB ? –> 2
             –> 0

    3.  C=1
        PC ? –> 3
             –> 0
}
```

Fig. 11.20
Programma sorgente per la programmazione del PLD per il pilotaggio del sistema di pompe scritto tenendo conto dell'ordine di esecuzione delle istruzioni da parte del compilatore.

In una macchina di Mealy le uscite e le variabili di stato commutano nell'istante in cui si ha la transizione attiva del segnale di clock. Affinché questa operazione avvenga senza inconvenienti è necessario che il dato in ingresso sia stabile nell'intervallo di tempo che precede la transizione attiva del segnale di clock (t_s) e nell'intervallo di tempo successivo a essa (t_h); entrambi gli intervalli dipendono dal tipo di dispositivo PLD che si sta usando. Una volta avvenuta la transizione attiva del segnale di clock, l'uscita può cambiare solo dopo che è trascorso un periodo di tempo superiore al minimo tempo di propagazione (t_m) delle memorie flip-flop.

t_s
– Set-up time
(tempo di assestamento)
t_h
– Hold time
(tempo di mantenimento)
t_m
– Minimum propagation time
(tempo di propagazione minimo)

La modifica dei segnali di uscita ha però conseguenze anche sulla rete combinatoria della macchina di Mealy che li utilizza, in controreazione, come segnali di ingresso. Appare infatti evidente che, per condizionare correttamente la commutazione delle memorie della macchina a stati finiti, i segnali generati da tale rete devono essere completamente stabili prima che giunga una nuova transizione attiva del segnale di clock; questo ritardo è valutato dal tempo massimo di propagazione (t_p) degli elementi che costituiscono la rete combinatoria. Se, infatti, la transizione attiva si verifica mentre la rete combinatoria sta commutando, la transizione dello stato della macchina non avviene correttamente.

t_c
– Clock time
(segnale di clock)

Per ottenere un'esatta temporizzazione dei segnali è quindi necessario coordinare il periodo del segnale di clock (***t_c***), il tempo di assestamento, il tempo di mantenimento e i ritardi minimo e massimo di propagazione. Per ottenere una temporizzazione esatta il file sorgente dev'essere riscritto nel modo indicato nella ***figura 11.21***: la transizione dallo stato 0 allo stato 1 è ottenuta quando il segnale di ingresso PA è attivo; lo stato dell'uscita A viene subito posto al livello logico alto e la macchina si predispone alla commutazione allo stato 1, che avverrà quando sarà fornito l'impulso di clock.

Nelle versioni precedenti del programma sorgente, la commutazione dell'uscita avviene contemporaneamente alla transizione dello stato nell'istante della transizione attiva del segnale di clock, per cui il dato in ingresso alle memorie non è stabile e il circuito può manifestare un comportamento difforme da quello previsto dalle specifiche del problema.

La ***figura 11.22*** mostra il rapporto generato dal compilatore PLD.

Una corretta valutazione del comportamento della macchina di Mealy può essere compiuta simulandone il funzionamento con le procedure di test descritte nei prossimi paragrafi.

Fig. 11.21
Programma sorgente per la programmazione del PLD per il pilotaggio del sistema di pompe scritto tenendo conto delle temporizzazioni corrette richieste dalla macchina di Mealy.

```
                CONTROLLI DI UN SISTEMA DI POMPE
                        STATI MACCHINA
| PAL16R6 in: (RESET,PA,PB,PC), out: (A,B,C,Q[2..0]), clock: CLOCK
|
| Title: "CONTROLLO DI UN SISTEMA DI POMPE"
|        "FA0297"
|
| Procedure:  RESET,Q[2..0]
| {
| 0.     PA & PB' & PC'?  –> 1
|        PB & PA & PC' ?  –> 2
|        PC & PA & PB' ?  –> 3
|        –> 0
|
| 1.     PA  ? (A=1       –> 1)
|        PA' ?            –> 0
|
| 2.     PB  ? (B=1       –> 2)
|        PB'# PA' ?       –> 0
|
| 3.     PC  ? (C=1       –> 3)
|        PC'# PA' ?       –> 0
|}
```

Fig. 11.22
File di progetto del circuito di controllo del sistema di pompe generato dal programma di compilazione (file: f-asm.lst).

```
OrCAD PLD COMPILER-386 V1.00  11/25/91  (Source file .\CTR-POM2.PLD)


  CONTROLLI DI UN SISTEMA DI POMPE
  STATI MACCHINA

  | PAL16R6  in:(RESET,PA,PB,PC), out:(A,B,C,Q[2..0]), clock: CLOCK
  |
  | Title:     "CONTROLLO DI UN SISTEMA DI POMPE"
  |            "FA0297"
  |
  |Procedure:  RESET,Q[2..0]
  |{
  | 0.   PA & PB' & PC'?   -> 1
  |      PB & PA & PC' ?   -> 2
  |      PC & PA & PB' ?   -> 3
  |      -> 0
  |
  | 1.   PA  ? (A=1        -> 1)
  |      PA' ?             -> 0
  |
  | 2.   PB  ? (B=1        -> 2)
  |      PB'# PA' ?        -> 0
  |
  | 3.   PC  ? (C=1        -> 3)
  |      PC'# PA' ?        -> 0
  |}
```

STATE TABLE FOR Q

State Label	State Number: Decimal	Binary	Level
0	0	000	LLL
1	1	001	LLH
2	2	010	LHL
3	3	011	LHH

(Alphabetical)

0	0	000	LLL
1	1	001	LLH
2	2	010	LHL
3	3	011	LHH

W325 A hardwired clock signal is attached to A.
W325 A hardwired clock signal is attached to B.
W325 A hardwired clock signal is attached to C.
W325 A hardwired clock signal is attached to Q1.
W325 A hardwired clock signal is attached to Q0.

RESOLVED EXPRESSIONS (Reduction 2)

Signal name	Rows	Terms
Q0'	48	PA' Q1'
	49	PB Q0'
	50	PC' Q1
	51	Q1 Q0'
	52	RESET
	53	Q2
Q1'	40	PB' Q1 Q0'
	41	PB PC Q1'
	42	PA' Q1'
	43	PB' PC'
	44	PC' Q0
	45	Q1' Q0
	46	RESET
	47	Q2
A'	8	RESET
	9	PA'
	10	Q2
	11	Q1
	12	Q0'
B'	16	RESET
	17	PB'
	18	Q2
	19	Q1'
	20	Q0
C'	24	RESET
	25	PC'
	26	Q2
	27	Q1'
	28	Q0'

SIGNAL ASSIGNMENT

Pin	Signal name	Column	Rows			Activity	
			Beg	Avail	Used		
1.	CLOCK	–	–	–	–	High	(Clock)
2.	RESET	0	–	–	–	High	
3.	PA	4	–	–	–	High	
4.	PB	8	–	–	–	High	
5.	PC	12	–	–	–	High	
6.	–	16	–	–	–		

7.	–	20	–	–	–		
8.	–	24	–	–	–		
9.	–	28	–	–	–		
12.	–	30	56	8	0		(Three-state)
13.	Q0	26	48	8	6	High	(Registered)
14.	Q1	22	40	8	8	High	(Registered)
15.	Q2	18	32	8	0	High	(Registered)
16.	C	14	24	8	5	High	(Registered)
17.	B	10	16	8	5	High	(Registered)
18.	A	6	8	8	5	High	(Registered)
19.	–	2	0	8	0		(Three-state)
				64	29	(45%)	

I200 No fatal errors found in source code.
I201 Five warnings.

FUSE MAP FOR PAL16R6

	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
0	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
1	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
2	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
3	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
4	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
5	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
6	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
7	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
8	x-	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
9	–	–	-x	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	x-	–	–	–	–	–	–
11	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	x-	–	–	–	–
12	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	-x	–	–
13	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
14	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
15	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
16	x-	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
17	–	–	–	–	-x	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
18	–	–	–	–	–	–	–	–	–	x-	–	–	–	–	–	–
19	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	-x	–	–	–	–
20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	x-	–	–
21	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
22	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
23	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
24	x-	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
25	–	–	–	–	–	–	-x	–	–	–	–	–	–	–	–	–
26	–	–	–	–	–	–	–	–	–	x-	–	–	–	–	–	–
27	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	-x	–	–	–	–
28	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	-x	–	–

```
29 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
30 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
31 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
32 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
33 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
34 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
35 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
36 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
37 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
38 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
39 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
40 –  –  –  –  -x –  –  –  –  –  –  x- –  -x –  –
41 –  –  –  –  x- –  x-    –  –  –  –  -x –  –  –
42 –  –  -x –  –  –  –  –  –  –  –  -x –  –  –  –
43 –  –  –  –  -x –  -x –  –  –  –  –  –  –  –  –
44 –  –  –  –  –  –  -x –  –  –  –  –  –  x- –  –
45 –  –  –  –  –  –  –  –  –  –  –  -x –  x- –  –
46 x-  –  –  –  –  –  –  –  –  –  –  –  –  –  –  –
47 –  –  –  –  –  –  –  –  –  x-  –  –  –  –  –  –
48 –  –  -x –  –  –  –  –  –  –  –  -x –  –  –  –
49 –  –  –  –  x- –  –  –  –  –  –  –  –  -x –  –
50 –  –  –  –  –  –  -x –  –  –  –  x- –  –  –  –
51 –  –  –  –  –  –  –  –  –  –  –  x- –  -x –  –
52 x-  –  –  –  –  –  –  –  –  –  –  –  –  –  –  –
53 –  –  –  –  –  –  –  –  –  x-  –  –  –  –  –  –
54 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
55 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
56 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
57 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
58 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
59 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
60 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
61 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
62 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
63 xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx xx
```

Legend: x fuse intact
- fuse open

887 fuses open of 2048 total.

```
OrCAD PLD-386
Type:    PAL16R6
Title:   CONTROLLO DI UN SISTEMA DI POMPE
         FA0297
*
QP20* QF2048* QV1024*
F0*
```

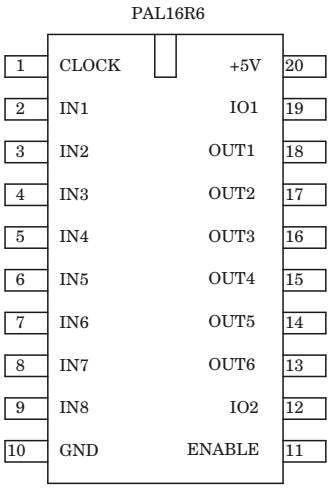
```
L0256 01 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 *
L0288 11 11 10 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 *
L0320 11 11 11 11 11 11 11 11 11 01 11 11 11 11 11 11 *
L0352 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 01 11 11 11 11 *
L0384 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 10 11 11 *
L0512 01 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 *
L0544 11 11 11 11 10 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 *
L0576 11 11 11 11 11 11 11 11 11 01 11 11 11 11 11 11 *
L0608 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 10 11 11 11 11 *
L0640 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 01 11 11 *
L0768 01 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 *
L0800 11 11 11 11 11 11 10 11 11 11 11 11 11 11 11 11 *
L0832 11 11 11 11 11 11 11 11 11 01 11 11 11 11 11 11 *
L0864 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 10 11 11 11 11 *
L0896 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 10 11 11 *
L1280 11 11 11 11 10 11 11 11 11 11 11 01 11 10 11 11 *
L1312 11 11 11 11 01 11 01 11 11 11 11 10 11 11 11 11 *
L1344 11 11 10 11 11 11 11 11 11 11 11 10 11 11 11 11 *
L1376 11 11 11 11 10 11 10 11 11 11 11 11 11 11 11 11 *
L1408 11 11 11 11 11 11 10 11 11 11 11 11 11 01 11 11 *
L1440 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 10 11 01 11 11 *
L1472 01 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 *
L1504 11 11 11 11 11 11 11 11 11 01 11 11 11 11 11 11 *
L1536 11 11 10 11 11 11 11 11 11 11 11 10 11 11 11 11 *
L1568 11 11 11 11 01 11 11 11 11 11 11 11 11 10 11 11 *
L1600 11 11 11 11 11 11 10 11 11 11 11 01 11 11 11 11 *
L1632 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 01 11 10 11 11 *
L1664 01 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 *
L1696 11 11 11 11 11 11 11 11 11 01 11 11 11 11 11 11 *
C6E47*

I202  6/5/97 2:41 pm (Thursday)
I203  Memory usage 38K
I204  Elapsed time 2 seconds
```

Assegnazione dei pin a un dispositivo PLD

L'esempio descritto in precedenza affidava al compilatore il compito di attribuire i segnali di ingresso e di uscita ai terminali del dispositivo fisico. Tale modo di procedere, però, non è sempre soddisfacente: in qualche applicazione il tecnico desidera che l'attribuzione sia predeterminata. Per effettuare questa operazione il linguaggio di programmazione del programma sorgente utilizza i metodi descritti nella ***figura 11.23***.

I tipi di PAL utilizzabili con il programma PLD sono listati in un file di testo allegato al programma denominato **device.txt**, che contiene le informazioni necessarie al compilatore per generare i file per la programmazione del dispositivo. Per ciascun PLD è mostrata la corrispondenza tra pin e tipo di segnale (in, io, out, clk, enable, reset, preset) e descritta la struttura interna del dispositivo.

Fig. 11.23
Disposizione dei segnali sui terminali della PAL16R6 e tabella di descrizione del componente.




```
| Type:      PAL16R6
| Activity   0

| Group 1 (in)       2 3 4 5 6 7 8 9
| Group 2 (out)      18 17 16 15 14 13
| Group 3 (io)       19 12
| Group 4 (clock)    1
| Group 5 (enable)   11

| Columns  2 19 3 18 4 17 5 16 6 15 7 14 8 13 9 12
| Rows     19(1t7) 18(8R) 17(8R) 16(8R) 15 (8R) 14(8R) 13 (8R) 12(1t7)
```

Poiché in molte applicazioni pratiche non risulta conveniente lasciare al compilatore di PLD il compito di stabilire la corrispondenza fra segnali e terminali del dispositivo, si può predeterminare lo schema di attribuzione scrivendo nel programma sorgente le linee:

```
|PAL16R6      2 : A, 3 : B, 4 : C
|             17 : C1, 18 : S

|PAL16R6      2 : PA, 3 : PB, 4; PC
|             13 : Q0, 14 : Q1, 15 : Q2, 16 : A,
|             17 : B, 18, C
|              1 : clock
```

PER FISSARE I CONCETTI

1. Con quali metodi, grafici o di altro tipo, si può descrivere un progetto logico in modo da ottenere, da un programma di compilazione per PLD, un codice in formato JEDEC che, utilizzato con un'apparecchiatura di programmazione di EPROM, permetta di programmare un PLD?
2. È possibile guidare l'assegnazione dei segnali ai terminali di un PLD o si deve sempre lasciar fare la selezione al compilatore di PLD?

3 SIMULAZIONE DI UN PLD

Prima di venire fisicamente realizzato mediante l'interruzione dei fusibili, un dispositivo PLD dev'essere controllato con un programma di simulazione che permetta di accertare che il circuito realizzato sia in grado di funzionare nel modo previsto dalle specifiche di progetto e che la sua descrizione sia stata correttamente scritta nelle equazioni editate nel programma sorgente del PLD.

Se l'esito della verifica è positivo, si trasferiscono le informazioni contenute nel file JEDEC a un'apparecchiatura di programmazione che le interpreta e le utilizza per programmare il dispositivo PLD.

Il dispositivo programmato può essere collaudato inserendolo nel circuito più complesso che lo impiega oppure da solo. Quest'ultimo collaudo può essere velocizzato e facilitato facendo generare automaticamente dal programma PLD un vettore di test che può essere impiegato anche da macchine ATE per collaudare il dispositivo.

La simulazione software del comportamento del circuito viene effettuata inserendo nel programma sorgente la parola chiave **Vectors**, seguita dall'elenco dei comandi che permettono di visualizzare i segnali e di generare la sequenza di valori che i segnali di ingresso devono assumere per controllare in modo completo il dispositivo.

I comandi utilizzati per programmare la simulazione di un dispositivo PLD sono elencati nella ***tabella 11.8***.

Tabella 11.8 Comandi utilizzati per la codifica della simulazione di un dispositivo PLD

COMANDI	DESCRIZIONE	ESEMPIO
Display	definisce quali segnali visualizzare specificandone il formato: b - binario; o - ottale; d - decimale; s - decimale con segno; h - esadecimale; L - livello logico (H/L); c - diagramma temporale a sviluppo verticale	– **Display (Q2, Q1, Q0)b, (Q2, Q1, Q0)c** visualizza i segnali Q2, Q1 e Q0 in formato binario e ne mostra il diagramma temporale a sviluppo verticale
Set	pone i segnali al valore specificato	– **Set A1 = 1** – **Set D[3..0] = 1011b**
Clear	pone a 0 il valore dei segnali specificati	– **Clear A3** – **Clear Q[7..0], LOAD**
Initialize	inizializza tutti i segnali a 1 o a 0	– **Initialize** oppure **Initialize 0** – **Initialize 1**
Test	descrive come un insieme di segnali deve essere controllato	– **Test (A1, B1) –> Z** genera la sequenza: 00, 01, 10, 11 – **Test C, D = (3..0)** genera la sequenza : 00, 01, 10, 11 – **Test CLK = 256 (01)** genera 256 transizioni
Verify	verifica che i segnali assumano determinati valori	– **Verify D[0..7] = 11110100b** controlla che gli 8 segnali assumano il valore indicato
Ripple	visualizza le commutazioni fra ogni stadio senza attendere che tutti i segnali si siano stabilizzati	– **Ripple** oppure **Ripple on** abilita il comando – **Ripple off** ripristina la condizione di visualizzazione precedente
Quit	scarica il vettore di test e termina la simulazione	– **Quit** bisogna confermare il comando con il tasto 'Y'
End	salva il vettore di test e termina la simulazione	– **End**

La ***figura 11.24*** mostra una versione del programma sorgente dell'addizionatore completo che contiene anche la sezione di programma che ne permette la simulazione. Il comando **Display** elenca i nomi dei segnali e il formato con cui si desidera visualizzarli, mentre il comando **Test** precisa quali segnali devono generare la sequenza di test da utilizzare nella simulazione.

Fig. 11.24
Codifica del test di simulazione di un circuito logico combinatorio (file: f-avect.pld).

```
        FULL - ADDER
        EQUAZIONI BOOLEANE

|  PAL16R6  in:(A, B, C0), out:(S, C1)
|
|  Title:   "FULL-ADDER"
|           "FA0197"
|
|      S    =  (A ## B) ## C0
|      C1   =  (A & B) # ((A##B) & C0)
|
|  Vectors:
|  { Display   (A, B, C0)c,"  ",(S, C1)c, "  ",\
|              (A, B, C0)b," " ,(S, C1)b
|  Test        A, B, C0
|
|  End }
```

La simulazione viene avviata con il programma **Vectors** dopo avere configurato opportunamente il programma (▸ ***Fig. 11.25***). Se non sono stati inseriti errori, il programma genera una simulazione completa del circuito sotto forma di un rapporto (memorizzato in un file testo con estensione .LOG) come quello mostrato nella ***figura 11.26***. Il formato di visualizzazione può essere adattato alle proprie esigenze con i codici riportati nella tabella 11.8.

Un procedimento diverso, oltre a quello di scrivere nel programma sorgente il vettore di test, è il seguente:

— per prima cosa si compila il programma sorgente, si configura il comando **Test Logic** e lo si esegue;
— sullo schermo video compare una linea orizzontale (il prompt del programma **Vectors**), e l'utente può ora digitare direttamente i comandi che desidera usare (**Set**, **Clear**, **Display**, **Test**, **Initialize**, **Ripple**, **Verify**, **Quit**, **End**);
— i comandi sono immediatamente eseguiti e l'esito dell'elaborazione è visualizzato; l'utente può così applicare iterativamente varie sequenze di segnali e valutare il comportamento del circuito nelle diverse situazioni.

Per terminare la simulazione occorre digitare il comando **Quit** o il comando **End**, a seconda che si voglia o meno salvare il vettore creato durante la sessione di simulazione.

La ***figura 11.27*** mostra il programma sorgente del circuito che controlla la sequenza di inserzione delle pompe. La ***figura 11.28*** mostra le sequenze generate dal processo di simulazione che permettono di verificare se il circuito si comporta nel modo stabilito dalle specifiche.

Fig. 11.25
Menu di configurazione Test Logic.

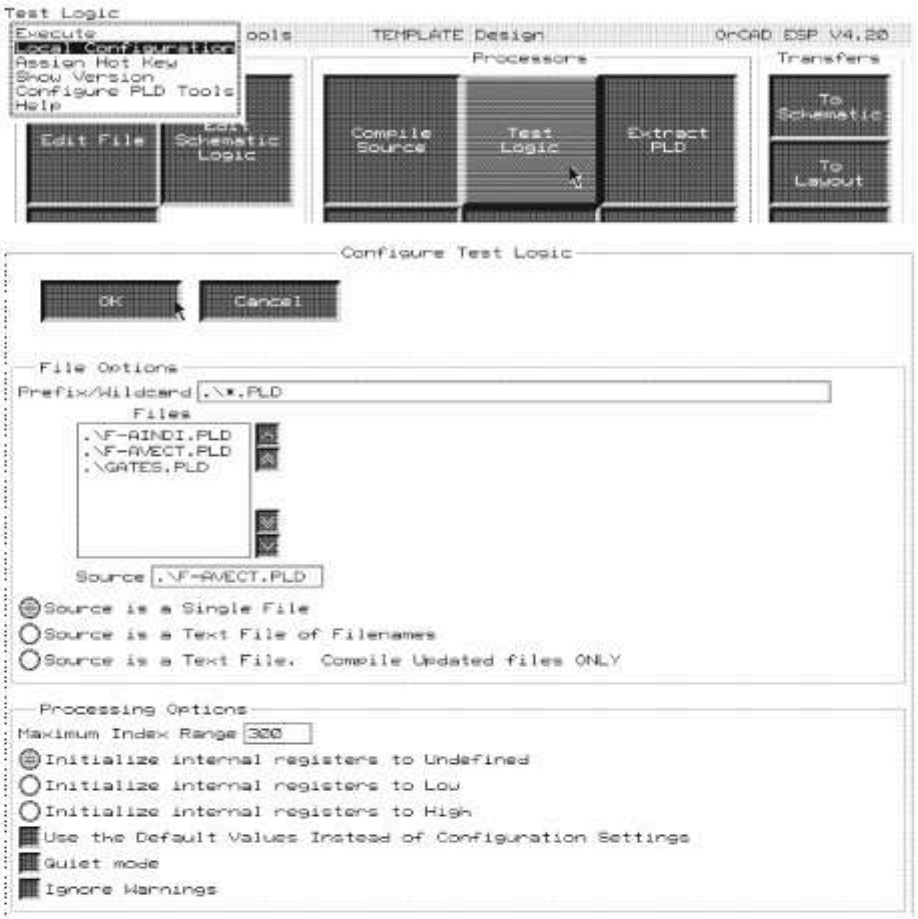


Fig. 11.26
Rapporto generato dal programma di simulazione (file: f-avect.log).

```
OrCAD TEST VECTOR GENERATOR-386  V1.00  11/25/91

{ Display (A, B, C0)c,"  ",(S, C1)c, "  ",\
          (A, B, C0)b," " ,(S, C1)b

  Test      A, B, C0
                000 00
                001 10
                010 10
                011 01
                100 10
                101 01
                110 01
                111 11

  End }
```

Fig. 11.27
Codifica del test di simulazione di un circuito logico sequenziale (file: f-avect.pld).

```
                CONTROLLI DI UN SISTEMA DI POMPE
                      STATI MACCHINA

|  PAL16R6  in: (RESET,PA,PB,PC), out: (A,B,C,Q[2..0]), clock: CLOCK
|
|  Title:  "CONTROLLO DI UN SISTEMA DI POMPE"
|          "FA0297"
|
| Procedure:  RESET,Q[2..0]
| {
|     0.  PA & PB' & PC'?  –>  1
|         PB & PA & PC' ?  –>  2
|         PC & PA & PB' ?  –>  3
|         –> 0
|
|     1.  A=1
|         PA  ?            –>  1
|         PA' ?            –>  0
|
|     2.  B=1
|         PB  ?            –>  2
|         PB'# PA' ?       –>  0
|
|     3.  C=1
|         PC  ?            –>  3
|         PC'# PA' ?       –>  0
|}

| Vectors:
| Display     "clock ",(CLOCK)c,"  ",(RESET)c," PA-PB-PC ",(PA, PB, PC)c,\
|             " Stato ", (Q[2..0])d," A-B-C ", (A, B, C)c, "  ",\
|             (A, B, C)L
| Test        RESET=1; CLOCK= 2(0,1)  | AZZERAMENTO
| Set         Reset=0
| Set         PA=1
| Set         PB,PC=0
| Test        CLOCK= 2(0,1)
| Set         PA=0
| Test        CLOCK= 2(0,1)
| Set         PA=1
| Set         PB=1
| Test        CLOCK= 2(0,1)
| Set         PA=0
| Set         PB=0
| Test        CLOCK= 2(0,1)
| Set         PA=1
| Set         PC=1
| Test        CLOCK= 2(0,1)
| Set         PC=0
| Test        CLOCK= 2(0,1)
| End}
```

Fig. 11.28
Rapporto generato dal programma di simulazione (file: ctr-pom3.log).

```
OrCAD TEST VECTOR GENERATOR-386  V1.00  11/25/91

| Display "clock ",(CLOCK)c,"  ",(RESET)c," PA-PB-PC ",(PA, PB, PC)c,\
|         " Stato ", (Q[2..0])d," A-B-C ", (A, B, C)c, "  ",\
|         (A, B, C)L

| Test    RESET=1; CLOCK= 2(0,1)  | AZZERAMENTO
clock ┌┘  └┐ PA-PB-PC │ │ │  Stato U A-B-C UU UU UU  UUU
clock └┐   │ PA-PB-PC │ │ │  Stato 0 A-B-C │  │  │   LLL
clock ┌┘   │ PA-PB-PC │ │ │  Stato 0 A-B-C │  │  │   LLL
clock └┐   │ PA-PB-PC │ │ │  Stato 0 A-B-C │  │  │   LLL

| Set     Reset=0

| Set     PA=1

| Set     PB,PC=0

| Test    CLOCK= 2(0,1)
clock ┌┘ ┌┘ PA-PB-PC └┐ │ │  Stato 0 A-B-C │  │  │   LLL
clock └┐ │  PA-PB-PC  │ │ │  Stato 1 A-B-C │  │  │   LLL
clock ┌┘ │  PA-PB-PC  │ │ │  Stato 1 A-B-C │  │  │   LLL
clock └┐ │  PA-PB-PC  │ │ │  Stato 1 A-B-C └┐ │  │   HLL

| Set     PA=0

| Test    CLOCK= 2(0,1)
clock ┌┘ │  PA-PB-PC ┌┘ │ │  Stato 1 A-B-C │  │  │   HLL
clock └┐ │  PA-PB-PC │  │ │  Stato 0 A-B-C ┌┘ │  │   LLL
clock ┌┘ │  PA-PB-PC │  │ │  Stato 0 A-B-C │  │  │   LLL
clock └┐ │  PA-PB-PC │  │ │  Stato 0 A-B-C │  │  │   LLL

| Set     PA=1

| Set     PB=1

| Test    CLOCK= 2(0,1)
clock ┌┘ │  PA-PB-PC └┐ └┐ │  Stato 0 A-B-C │  │  │   LLL
clock └┐ │  PA-PB-PC  │  │ │  Stato 2 A-B-C │  │  │   LLL
clock ┌┘ │  PA-PB-PC  │  │ │  Stato 2 A-B-C │  │  │   LLL
clock └┐ │  PA-PB-PC  │  │ │  Stato 2 A-B-C │  └┐ │   LHL

| Set     PA=0

| Set     PB=0

| Test    CLOCK= 2(0,1)
clock ┌┘ │  PA-PB-PC ┌┘ ┌┘ │  Stato 2 A-B-C │  │  │   LHL
clock └┐ │  PA-PB-PC │  │  │  Stato 0 A-B-C │ ┌┘  │   LLL
clock ┌┘ │  PA-PB-PC │  │  │  Stato 0 A-B-C │ │   │   LLL
clock └┐ │  PA-PB-PC │  │  │  Stato 0 A-B-C │ │   │   LLL

| Set     PA=1

| Set     PC=1

| Test    CLOCK= 2(0,1)
clock ┌┘ │  PA-PB-PC └┐ │ └┐ Stato 0 A-B-C │  │  │   LLL
clock └┐ │  PA-PB-PC  │ │  │ Stato 3 A-B-C │  │  │   LLL
clock ┌┘ │  PA-PB-PC  │ │  │ Stato 3 A-B-C │  │  │   LLL
clock └┐ │  PA-PB-PC  │ │  │ Stato 3 A-B-C │  │  └┐  LLH

| Set     PC=0

| Test    CLOCK= 2(0,1)
clock ┌┘ │  PA-PB-PC │ │ ┌┘ Stato 3 A-B-C │  │  │   LLH
clock └┐ │  PA-PB-PC │ │ │  Stato 0 A-B-C │  │ ┌┘   LLL
clock ┌┘ │  PA-PB-PC │ │ │  Stato 0 A-B-C │  │ │    LLL
clock └┐ │  PA-PB-PC │ │ │  Stato 1 A-B-C │  │ │    LLL

| End)
```

PER FISSARE I CONCETTI

1. Quali vantaggi offre la simulazione di un PLD?
2. Che cos'è un vettore di test?
3. Quali sono i formati di uscita di una simulazione di un PLD? Con quali criteri dovrebbero essere scelti?

SINTESI DEL MODULO F

CAPITOLO 10

I **circuiti integrati full-custom** hanno decisamente migliorato l'efficienza dei progetti elettronici: i produttori di componenti elettronici li mettono a punto sulla base delle specifiche tecniche dei clienti, personalizzandone e ottimizzandone la configurazione circuitale, e le caratteristiche elettriche statiche e dinamiche.

— I **circuiti integrati semi-custom**, che combinano i vantaggi di modularità e flessibilità dei circuiti standard con quelle di affidabilità e di economicità dei circuiti full-custom, hanno dato un ulteriore contributo di flessibilità dei full-custom.

— I dispositivi logici programmabili **PAL** e **PLA** possono sintetizzare soltanto circuiti in logica combinatoria. Per la sintesi dei circuiti sequenziali si utilizzano i dispositivi **PLD** o **PLS**, che contengono: struttura a matrici di porte, buffer sulle linee di ingresso e di uscita (anche bidirezionali), elementi di memoria (flip-flop) e linee di retroazione. Con questi dispositivi si è in grado di sintetizzare, tramite automi a stati finiti, delle macchine sequenziali (di Mealy), programmate per percorrere in maniera sincrona, in funzione di un segnale di clock esterno, una tabella degli stati.

— La procedura standard per la **programmazione dei PLD** prevede l'introduzione dei dati iniziali, sotto forma di schema logico, di equazioni logiche, di descrizione di macchine a stati finiti o anche di lista dei collegamenti tramite un editor di testi, seguita dalla riduzione logica, dalla simulazione e dalla definizione di un file di programmazione nel formato standard JEDEC.

I dispositivi PLA e PLD possono essere configurati (come avviene per le ROM) personalizzando l'ultima fase di deposizione dei microcollegamenti in alluminio sul chip (**mascheratura**): in questo caso vengono detti **gate array**.

— Il gate array viene progettato utilizzando blocchi logici elementari che eseguono funzioni logiche predefinite (*macrocells*) disposte secondo un'organizzazione a matrice (per righe e colonne), viene simulato al calcolatore e poi convertito in maschere per la produzione da un programma chiamato **compilatore di silicio**. Questo programma è concettualmente simile ai compilatori software.

— Le **celle standard** permettono di affrontare il progetto del circuito integrato da un punto di vista funzionale. Il progettista, avvalendosi di strumenti informatici sofisticati, progetta il circuito integrato accedendo a librerie che contengono il modello funzionale e temporale del dispositivo reale, la rappresentazione standardizzata del layout e le procedure da impiegare per la realizzazione delle maschere destinate alla produzione del componente.

Si termina con la fase di collaudo e di test, cui può seguire una modifica del circuito per ovviare a errori o difetti; in loro assenza si procede all'avvio della produzione vera e propria.

CAPITOLO 11

La programmazione dei dispositivi PLD viene effettuata con software specifici che integrano quelli di simulazione e di verifica del funzionamento. Nel testo abbiamo preso a riferimento il pacchetto software OrCAD/PLD, che per descrivere le caratteristiche logiche del dispositivo e attivare le procedure di compilazione e di verifica dei circuiti mette a disposizione del progettista le sezioni: Editors, Processors, Transfers, Users.

— Esistono più modi di descrivere i circuiti elettronici da realizzare con un dispositivo PLD: le **equazioni booleane** (scritte con un qualsiasi programma di editor, vengono tradotte e sintetizzate dal compilatore PLD nella forma di somma di prodotti per la successiva elaborazione); le **equazioni indicizzate** (descrivono i componenti più complessi rappresentandoli come una combinazione di circuiti logici fondamentali); le **tabelle della verità** (delegano al programma compilatore la trasformazione e la riduzione delle informazioni); gli **stati macchina** (sono utilizzati quando il circuito da realizzare è di tipo sequenziale e si può descriverlo mediante il diagramma degli stati di una macchina a stati finiti); le **mappe numeriche**; lo **schema logico** (usa un editor grafico per disegnare lo schema del circuito da cui, mediante opportune trasformazioni, si ottengono poi i file per la programmazione dei dispositivi PLD).

— Il linguaggio più semplice e universalmente utilizzato per programmare i PLD è quello basato sulle **equazioni booleane**. Queste equazioni impiegano i tre operatori fondamentali AND, OR, NOT. I nomi assegnati ai segnali sono indicati con combinazioni di lettere (da *A* a *Z*) e di cifre (da 0 a 9): il primo carattere dev'essere una lettera; i numeri possono espressi in vari formati (decimale, binario, ottale, esadecimale). Le cifre che in un numero rappresentato in notazione binaria, ottale o esadecimale assumono un valore di indifferenza (*don't care*) sono sostituite con il carattere X.

— Prima di essere fisicamente realizzato mediante l'interruzione dei fusibili, un dispositivo PLD dev'essere controllato con un **programma di simulazione** che permetta di accertarne il funzionamento nel modo previsto dalle specifiche di progetto e di verificare che la sua descrizione tramite le equazioni editate nel programma sorgente del PLD sia corretta.

— Se l'**esito della verifica è positivo**, le informazioni contenute nel file JEDEC vengono trasferite a un'apparecchiatura di programmazione in grado di interpretarle e di utilizzarle per programmare il dispositivo PLD.

— Il dispositivo programmato **può essere collaudato** sia inserendolo nel circuito più complesso che lo impiega, sia da solo. Quest'ultimo collaudo può essere velocizzato e facilitato facendo generare automaticamente dal programma PLD un vettore di test che può essere impiegato anche da macchine ATE.

VERIFICHE

1.
Scrivi, mediante il linguaggio booleano, il programma sorgente di descrizione di un multiplexer da 4 a 1 (▸ micrologico 74253, scaricabile dal sito Internet).

2.
Scrivi, mediante un'equazione indicizzata, il programma sorgente di descrizione di un decodificatore decimale (▸ micrologico 7442, scaricabile dal sito Internet).

3.
Scrivi, mediante la tabella della verità, il programma sorgente di descrizione di un codificatore a priorità (▸ micrologico 74147, scaricabile dal sito Internet).

4.
Realizza il circuito proposto nel precedente ***esercizio 3*** con un flusso di dati (stream).

5.
Realizza un comparatore a 8 bit (▸ micrologico 74LS682, scaricabile dal sito Internet).

6.
Scrivi, utilizzando il metodo che ritieni migliore, il programma sorgente di un decodificatore BCD esadecimale per il pilotaggio di un display 7-segmenti.

7.
Realizza un contatore binario decrescente con modulo 1024.

8.
Scrivi, mediante il disegno dello schema elettrico, il programma sorgente di descrizione di un circuito di conteggio formato da un contatore BCD crescente a una cifra, un latch a 4 bit e un decodificatore BCD-7 segmenti (▸ micrologico 74144, scaricabile dal sito Internet).

9.
Realizza, mediante il diagramma degli stati, un contatore ottale up/down prevedendo anche un segnale di reset sincrono.

10.
Scrivi il vettore di simulazione del contatore proposto nel precedente ***esercizio 9***.

MODULO G

Programmi di simulazione

CAP 12 PROGRAMMA DI VERIFICA E SIMULAZIONE DEI SISTEMI DIGITALI

CAP 13 SIMULAZIONE DEI SISTEMI ANALOGICI E DIGITALI: Spice®

CAP 14 STRUMENTAZIONE VIRTUALE: LabVIEW®

Prerequisiti

- Uso del personal computer.
- Utilizzo dell'interfaccia grafica Windows.
- Principio di funzionamento degli strumenti di laboratorio fondamentali (alimentatore, multimetro, generatore di funzione, oscilloscopio).
- Teoria delle misure.
- Collaudo di un circuito elettronico con gli strumenti tradizionali.

Obiettivi

Conoscenze

- Analisi del funzionamento di un circuito con un programma di simulazione.
- Logica di funzionamento di un simulatore analogico-digitale.
- Valutazione delle misure e dell'affidabilità di una simulazione.
- Problemi legati alla sostituzione di uno strumento di misura tradizionale con uno strumento virtuale.

Competenze

- Saper utilizzare i principali programmi di simulazione elettronica per valutare il funzionamento e le prestazioni di un'apparecchiatura analogica o digitale.
- Saper scegliere i segnali di stimolo del circuito significativi per poterlo collaudare o controllare in condizioni di funzionamento difficilmente realizzabili con il prototipo reale.
- Saper utilizzare gli strumenti virtuali basati sul personal computer.

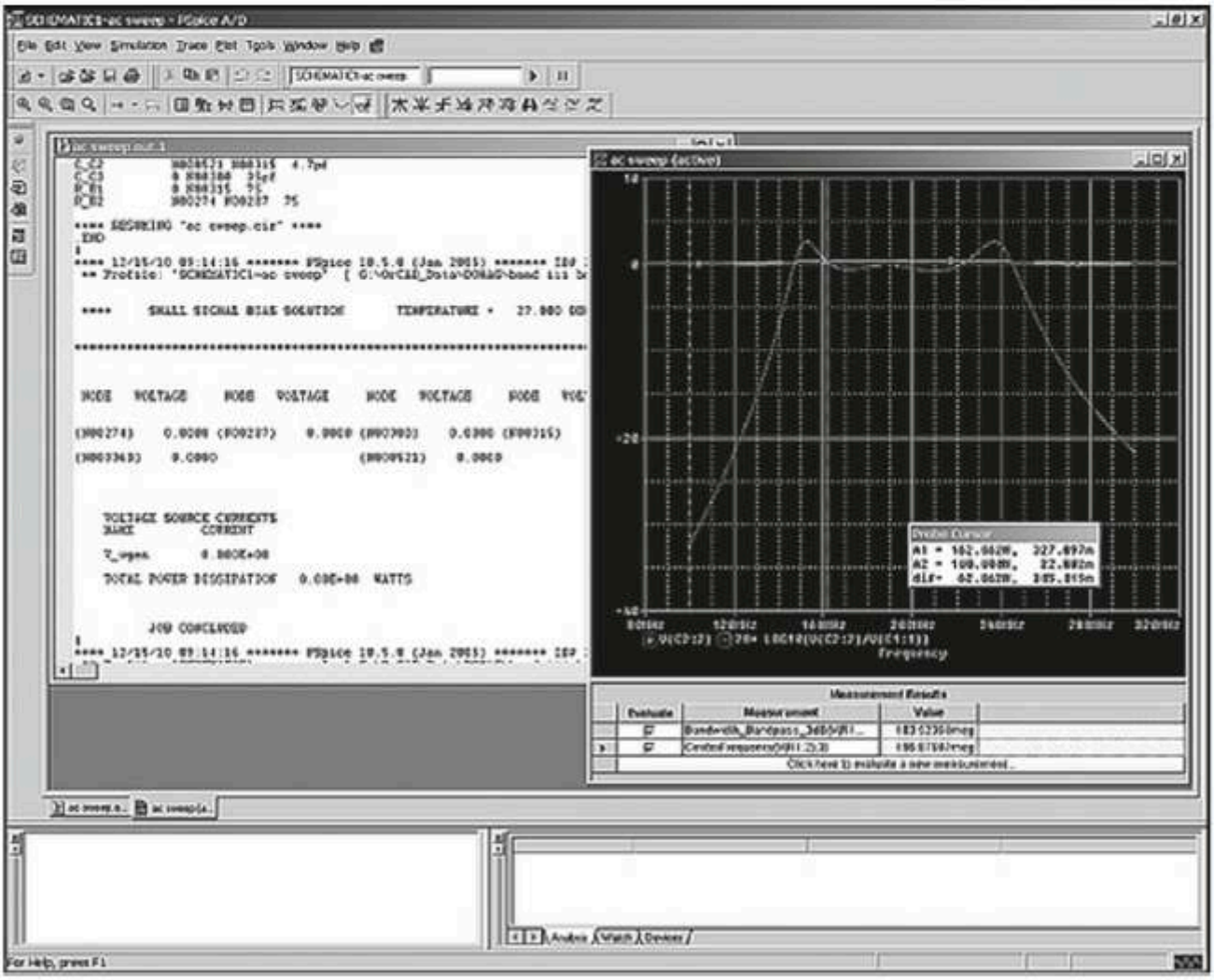
RISORSE ONLINE

CAP 12 PROGRAMMA DI VERIFICA E SIMULAZIONE DEI SISTEMI DIGITALI

1 Preparazione dello schema
2 Programma di simulazione: Simulate
3 Modellazione dei dispositivi
4 Applicazioni

Concetti chiave

- Breakpoint
- Check Electrical Rules
- Libreria
- Marker
- Modello
- Netlist
- Stimolo
- Vettore di test

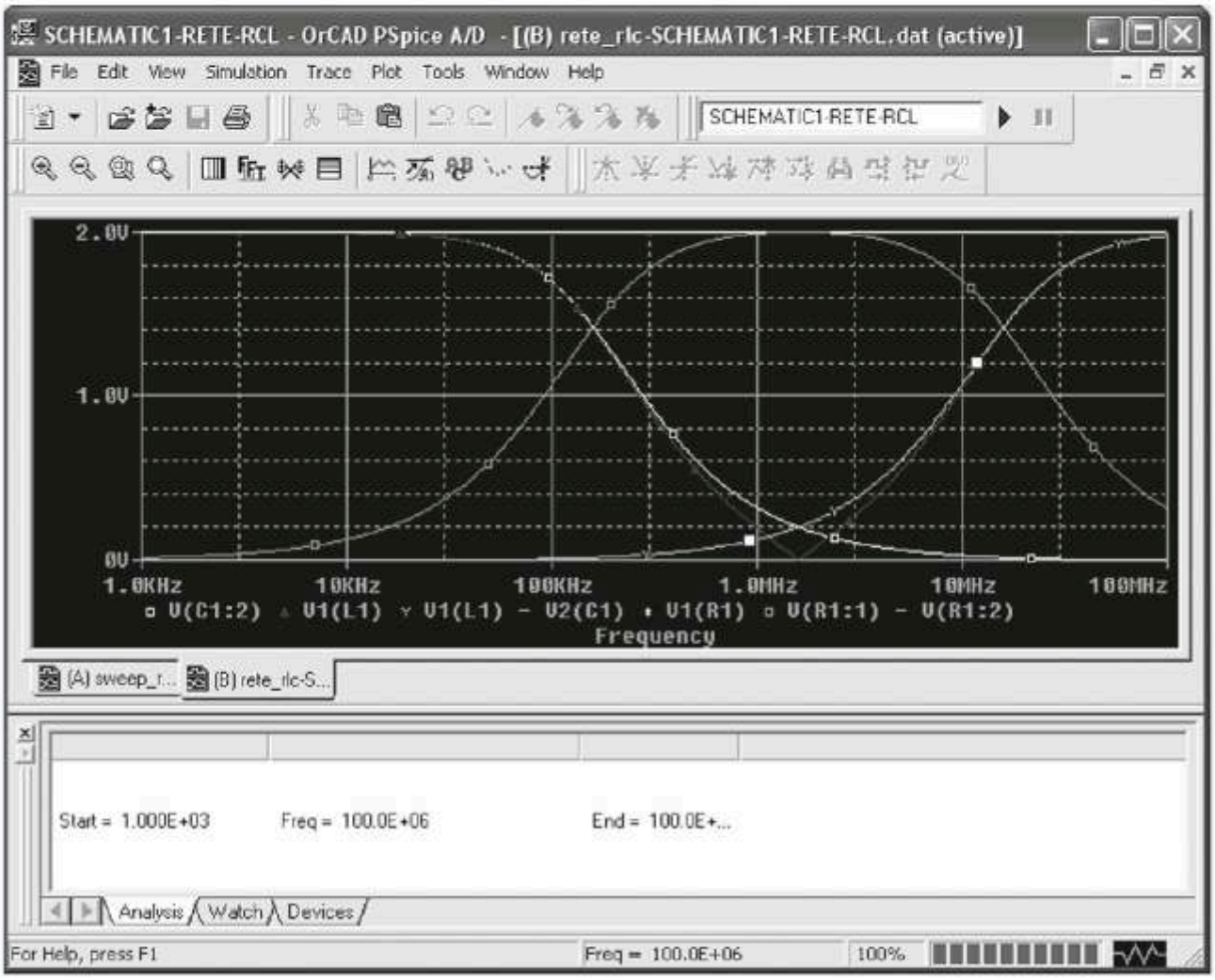


CAP 13 SIMULAZIONE DEI SISTEMI ANALOGICI E DIGITALI: Spice®

1 Analisi di una rete in regime stazionario. Determinazione del punto di lavoro statico
2 Analisi di una rete in regime stazionario. Sweep Mode
3 Analisi di una rete in regime sinusoidale
4 Analisi di una rete in transitorio
5 Simulazione dei circuiti digitali
6 Caratteristiche del programma di simulazione OrCAD PSPICE AD

Concetti chiave

- Analisi in regime sinusoidale
- Analisi in regime stazionario
- Analisi in transitorio
- Marker
- Netlist
- Riferimento di massa
- Simulazione
- Stimolo

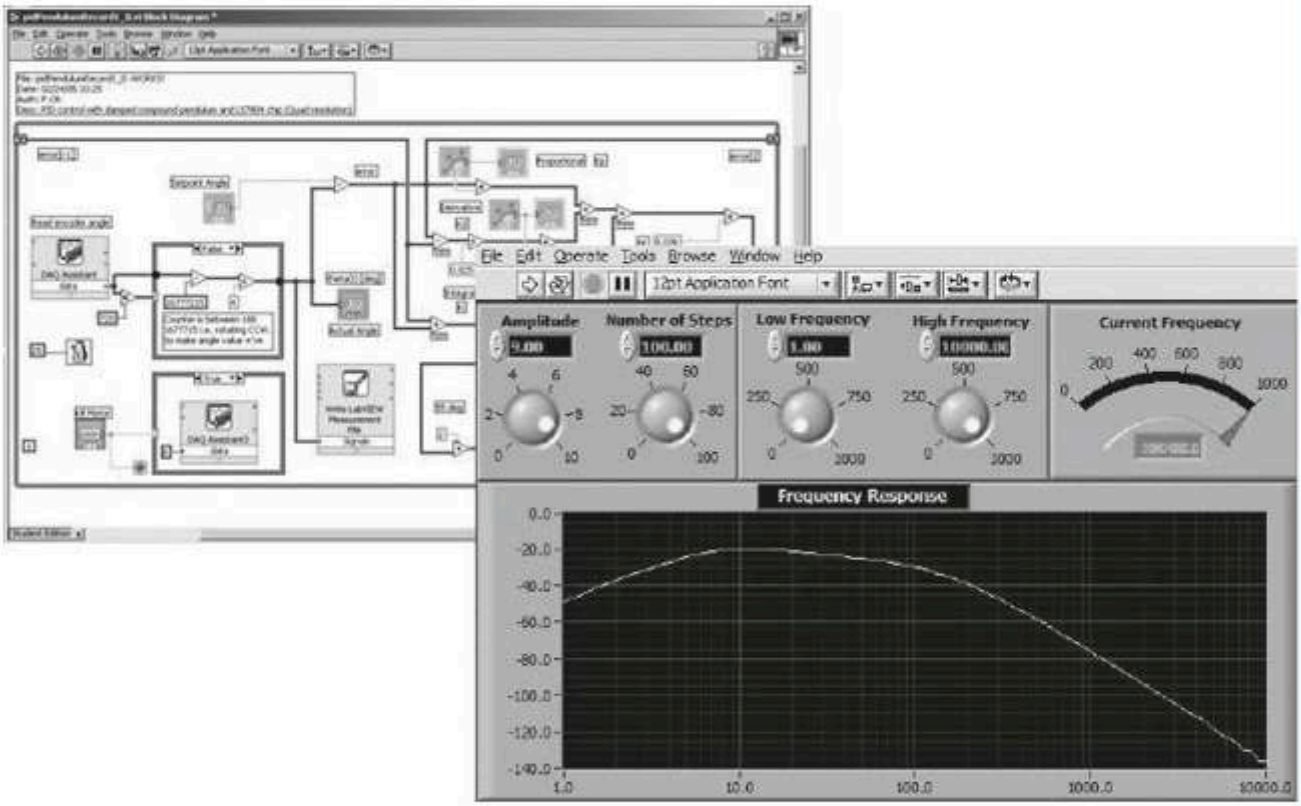


CAP 14 STRUMENTAZIONE VIRTUALE: LabVIEW®

1 L'ambiente di sviluppo LabVIEW
2 Diagramma a blocchi
3 Programmazione di uno strumento virtuale
4 Strutture dei dati
5 Strutture di programmazione

Concetti chiave

- Cluster
- Diagramma a blocchi
- Struttura virtuale
- Formula node
- Breakpoint
- Vettori
- Waveform
- Indicatori
- Sequenze
- Polimorfismo



SINTESI DEL MODULO G

CAPITOLO 12

La verifica funzionale di un progetto elettronico può essere effettuata in due modi: costruendo un prototipo sperimentale o simulando il comportamento del circuito utilizzando un programma di simulazione.
La verifica funzionale basata su un prototipo del circuito presenta l'inconveniente che i test di verifica, in laboratorio, non possono riprodurre esattamente le condizioni di lavoro effettive dell'apparecchiatura o generare segnali di ingresso tali da verificare il funzionamento dell'apparecchiatura in condizioni critiche. Un programma di simulazione è, invece, in grado di simulare perfettamente tutte queste situazioni e consente al progettista di modificare i vari parametri che influenzano il comportamento dell'apparecchiatura e di verificarne l'effetto sulle uscite.
Il programma di simulazione trasforma il circuito da verificare, utilizzando dei modelli dei componenti che lo compongono, in un modello software cui sono applicati in ingresso opportuni segnali di stimolo ai quali il circuito reagisce generando forme d'onda digitali d'uscita che il sistema memorizza e visualizza.
Il circuito da sottoporre a prove di verifica e simulazione deve preventivamente essere disegnato utilizzando il programma di cattura degli schemi; deve essere, poi, controllato con il programma di utilità ERC attivato dal tasto **Check Electrical Rules** per verificare che non vi siano errori che violino le regole elettriche fondamentali.
— Il modello dei componenti impiegati nello schema devono essere disponibili nella libreria utilizzata dal programma di simulazione; se un dispositivo non è presente il progettista può crearlo o continuare la simulazione anche senza di esso.
— Il progettista deve, quindi, mettere a punto uno stimolo per il circuito. Lo **stimolo** è un qualsiasi segnale esterno applicato ai nodi dello schema che rappresenta il dispositivo (per esempio un segnale di clock o un segnale di reset). I parametri di uno stimolo possono essere definiti dal progettista con un apposito programma di editor oppure con un vettore di ingressi di test.
Il **vettore di test** permette di modificare i segnali con una temporizzazione arbitraria. L'utente può modificare l'intervallo di tempo fra l'applicazione di uno stimolo e quella del successivo. L'unità di tempo viene fissata mediante la scelta di un'opportuna opzione del menu dei comandi del programma di simulazione; i tempi possono essere anche frazioni di nanosecondi.
— Il programma di simulazione è in grado di visualizzare lo stato dei segnali mediante un formato simile a quello degli analizzatori degli stati logici. La rappresentazione può avvenire al livello di segnale o a quello di bus.
— Il tracciamento dei segnali può essere effettuato programmando il tempo di campionamento oppure agganciando la visualizzazione solo dopo che sia trascorso un intervallo di tempo determinato dall'utente.
— I segnali visualizzati possono poi essere manipolati e memorizzati su supporti magnetici per creare la documentazione di supporto alle prove di verifica effettuate.
— Un'altra possibilità interessante offerta dal programma di simulazione è quella di poter bloccare la simulazione quando un segnale o un gruppo di segnali assumono un valore specificato dall'utente (*breakpoints*).

CAPITOLO 13

Il programma Spice (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis-Simulatore di circuiti con particolare enfasi per quelli integrati) è uno strumento informatico che consente di effettuare la simulazione dei circuiti elettrici ed elettronici; esso ha una larga diffusione sia negli ambienti della ricerca sia in quelli della produzione.
Il programma serve per determinare le tensioni e le correnti nei singoli lati di una rete elettrica o per fare esperimenti di laboratorio su un circuito senza realizzarlo fisicamente. Le versioni di Spice sono state realizzate per ogni tipo di sistema operativo (PC, Macintosh e grandi sistemi come Unix) e sono disponibili varie versioni di valutazione o student edition facilmente reperibili su Internet (www.orcad.com).
Il programma consente di verificare quando le approssimazioni introdotte nell'analisi teorica dei circuiti siano adeguate, e permette di effettuare sperimentazioni virtuali.
Il programma è in grado di eseguire su un circuito tre tipi di analisi: in corrente continua (DC), in transitorio (TRAN) e in corrente alternata (AC).
L'analisi in corrente continua permette di calcolare il punto di lavoro statico del circuito (i condensatori sono sconnessi e gli induttori corto-circuitati) e la caratteristica di trasferimento quasi statica del circuito. Se una o più delle caratteristiche tensione-corrente dei componenti presenti è non lineare, le equazioni risolventi sono anch'esse non lineari, il calcolo analitico del funzionamento del circuito è molto oneroso, la simulazione invece è molto rapida e permette valutazioni progettuali veloci ed efficaci.
L'analisi in corrente alternata viene effettuata per piccoli segnali che variano attorno al punto di lavoro statico e genera la risposta in frequenza del circuito.
L'analisi in transitorio viene utilizzata per analizzare, partendo dal punto di lavoro statico la risposta del circuito a grandi segnali e fornisce la risposta nel tempo del circuito a uno stimolo applicato in ingresso.
Il processo di simulazione richiede che si inizi il progetto con la cattura dello schema elettrico del circuito da verificare. L'operazione può essere effettuata creando un file di input (netlist) con un editor di testo che contenga le informazioni riguardanti lo schema circuitale del circuito

da sottoporre a prova (componenti, loro proprietà, nodi di connessione ecc.) oppure disegnare con un editor schematico (per esempio, OrCAD Capture) lo schema del circuito e poi estrarre le informazioni da esso in modo automatico. Affinché lo schema possa fornire al programma le informazioni in modo corretto è necessario: che il circuito abbia sempre un nodo di massa (GND), cui deve essere connesso ogni altro nodo da almeno un cammino in corrente continua (DC); che due generatori di tensione non siano connessi fra loro in parallelo senza una resistenza in serie o che due generatori di corrente siano connessi in serie senza resistenza in parallelo; che non ci siano nodi isolati.
Il circuito va poi completato aggiungendo i marker che individuano quali nodi e quali grandezze (tensioni o correnti) si vogliono esaminare durante la simulazione.
Il programma partendo dalle informazioni fornite dalla netlist esegue la simulazione e fornisce i file di uscita contenenti i risultati.
Utilizzando l'applicazione OrCAD PSpice AD si può elaborare il file prodotto da Spice per ottenere la visualizzazione dei risultati in forma grafica.
Si può conferire affidabilità, quindi maggiore accettazione dei risultati forniti dal sistema di verifica e di simulazione, se si è ben sicuri delle procedure adottate. Da qui la necessità di imparare a utilizzare il programma attraverso esempi che possano essere valutati completamente per via analitica e sperimentale. Solo dopo è possibile testare circuiti complessi ove la soluzione analitica richiede calcoli complessi di difficile e lunga elaborazione. In questo caso il sistema di verifica e simulazione diventa una preziosa e affidabile fonte di conoscenza.
Un sistema di verifica e simulazione non può, comunque, sostituire completamente le prove e le sperimentazioni di laboratorio, ma il suo utilizzo riduce sicuramente i tempi di sviluppo di un'apparecchiatura, facendo emergere criticità che permettano di escludere fin dall'inizio soluzioni errate o insoddisfacenti, fa venire a galla i problemi e aiuta nella loro soluzione.
Le caratteristiche circuitali possono essere modificate facilmente così come i valori attribuiti ai componenti e le sperimentazioni sono rapide e, se correttamente eseguite, affidabili.

CAPITOLO 14

Si è ormai affermata la tendenza a utilizzare i PC come *motori* della strumentazione. Gli **strumenti virtuali** (VI) fanno propria la struttura aperta adottata dai PC per quanto riguarda i processori, le memorie e la visualizzazione, mentre la possibilità di inserimento nel bus di schede a basso costo e di immediata disponibilità per l'acquisizione dei dati e l'interfacciamento di strumenti fornisce al PC le prestazioni necessarie per le applicazioni di strumentazione.
— I dispositivi di acquisizione dati (DAQ) sono schede plug-in che si inseriscono direttamente nel bus dati del computer. I trasduttori sono collegati a esse direttamente o attraverso una scheda di condizionamento del segnale, che può essere sia analogico sia digitale.
— La **libreria di strumenti** che supporta l'ambiente di sviluppo LabVIEW mette a disposizione dei tecnici i driver degli strumenti più diffusi sul mercato; ciò consente di ridurre drasticamente i tempi di programmazione e di concentrarsi sull'architettura del sistema di misura.
— L'**ambiente di sviluppo** a disposizione del progettista utilizza una serie di componenti grafici che permette la composizione sullo schermo di strumenti virtuali. Le funzionalità dello strumento virtuale sono ovviamente superiori a quelle dello strumento tradizionale perché il primo è programmabile e può facilmente essere arricchito con nuove prestazioni.
— Il **pannello frontale** dello strumento visualizzato sullo schermo permette all'operatore di inserire dati, di visualizzare misure, di predisporre il funzionamento dello strumento con operazioni analoghe a quelle effettuate premendo pulsanti su uno strumento tradizionale. Gli elementi che si possono collocare sul pannello frontale sono: i controlli, gli indicatori e gli elementi di completamento.
— I **controlli** sono gli strumenti usati per inserire nel programma i dati da elaborare. I dati acquisiti ed elaborati vengono visualizzati mediante strumenti detti **indicatori**; sono suddivisi in numerici, booleani e alfanumerici.
Lo strumento virtuale viene realizzato con un linguaggio di programmazione grafico basato sul **diagramma a blocchi** e sulla rappresentazione del **flusso dei dati** (*data flow programming*). Lo spessore delle linee di connessione permette di distinguere se i dati trasferiti sono singoli o aggregati (vettori, cluster); per facilitare la gestione dei dati numerici il programma utilizza un codice a colori che ne individua il formato.
— Il programma non consente connessioni fra oggetti incompatibili e segnala l'errore tratteggiando la linea di collegamento senza connettere gli oggetti. La struttura di controllo effettua l'elaborazione dei dati forniti dai terminali di ingresso, dalle costanti, da altre strutture di controllo utilizzando elementi grafici che replicano le strutture di controllo tipiche dei linguaggi di programmazione e alcune strutture di calcolo tipiche come i **Formula node** e le **Sequenze**.
— Ogni strumento virtuale viene individuato mediante un'icona che lo identifica in modo univoco, così da poter essere riutilizzato in altre applicazioni. L'icona viene posizionata dal programma in alto a destra; cliccando su di essa con il pulsante destro si apre un menu a tendina che consente al progettista di effettuare una serie di operazioni sulle proprietà dello strumento virtuale.
— I dati che possono essere trattati dallo strumento virtuale sono singoli (scalari), di tipo numerico, booleano o alfanumerico, ma anche strutture più complesse contenenti insiemi di dati omogenei (**vettori**) o eterogenei (**cluster**, **waveform**).

MODULO H

Dispositivi di conversione della tensione di alimentazione

CAP 15

ALIMENTATORI

Prerequisiti

- Dimensionamento corretto di un dissipatore di calore.
- Teoria delle reti elettriche.
- Principali dispositivi semiconduttori discreti.

Obiettivi

Conoscenze

- Valutazione delle prestazioni degli alimentatori in base ai parametri caratteristici.
- Scelta della configurazione circuitale più adatta.
- Principio di funzionamento di un alimentatore lineare.
- Principio di funzionamento di un alimentatore a commutazione.

Competenze

- Saper progettare, dimensionare e realizzare alimentatori lineari e a commutazione.
- Saper dimensionare correttamente i dispositivi di potenza.
- Saper scegliere e dimensionare i dissipatori di calore.

CAP 15

ALIMENTATORI

Concetti chiave

- Raddrizzatore a onda intera
- Regolazione serie
- Tensione di dropout
- Fattore di ondulazione residua (ripple)
- Regolazione parallela

1 Alimentatori lineari
2 Regolatori integrati
3 Alimentatori a commutazione
4 Confronto tra alimentatori lineari e alimentatori a commutazione
5 Convertitori di corrente continua (DC/DC)
Applicazione 1: Alimentatore a componenti discreti
Applicazione 2: Alimentatore con regolatore a tre terminali

RISORSE ONLINE

Applicazione 3: Alimentatore con tensione di uscita duale
Applicazione 4: Alimentatore con regolatore a tre terminali con tensione di uscita regolabile
Applicazione 5: Alimentatore con regolatore a quattro terminali con tensione di uscita regolabile

Gli alimentatori sono particolari assemblaggi di componenti elettronici che convertono l'energia ricevuta dalla rete di alimentazione in corrente alternata nella forma richiesta dall'apparato elettronico che dev'essere alimentato. La quasi totalità delle apparecchiature elettroniche richiede una tensione di alimentazione in corrente continua stabilizzata, cioè una tensione costante nel tempo che non cambia al variare (entro limiti precisi) della tensione di ingresso, della corrente assorbita dal carico in uscita e della temperatura.

1 ALIMENTATORI LINEARI

Un tipico alimentatore corrente alternata-corrente continua è formato dai seguenti elementi funzionali (◗ ***Fig. 15.1***):

— trasformatore di rete;
— circuito raddrizzatore;
— filtro di livellamento;
— regolatore o stabilizzatore di tensione (*voltage regulator*).

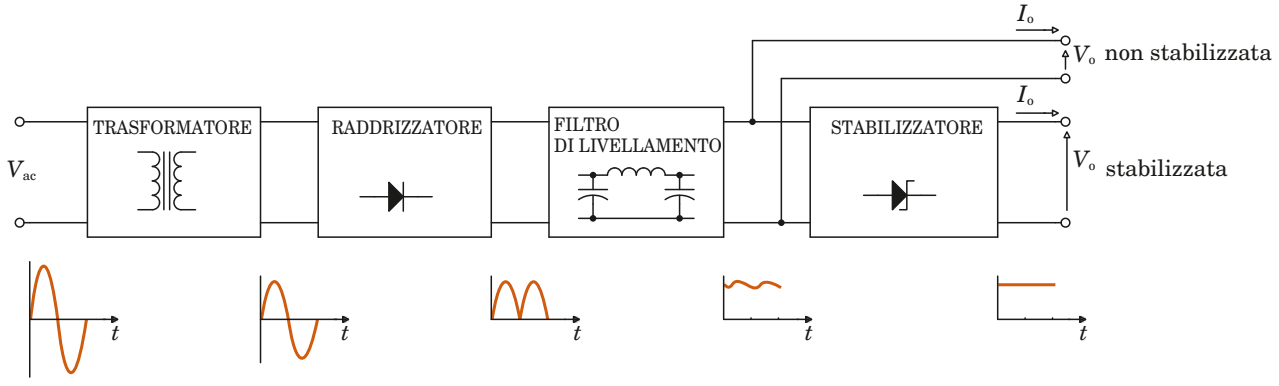


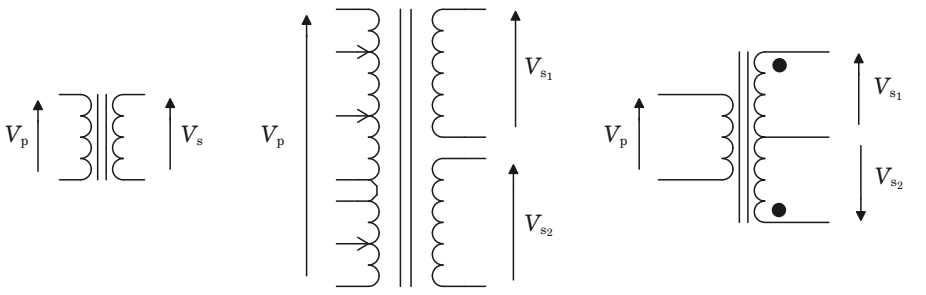
Fig. 15.1
Schema a blocchi rappresentante un alimentatore in corrente continua.

Trasformatore di rete

Il trasformatore di rete provvede di norma ad abbassare il valore della tensione di ingresso.

La necessità di utilizzare un trasformatore nella realizzazione di un

Figg. 15.2a, b, c
Tipi di trasformatore utilizzati per la realizzazione degli alimentatori:
a. con un avvoglimento primario e uno secondario;
b. con più secondari indipendenti;
c. con secondario a presa centrale.



15.2a **15.2b** **15.2c**

convertitore corrente alternata-corrente continua è imposta dalle norme legislative che prevedono, per ragioni di sicurezza, l'isolamento degli organi di comando delle apparecchiature elettroniche.

Il trasformatore garantisce una separazione galvanica tra circuito di ingresso a corrente alternata e circuito alimentato a corrente continua con alti valori di isolamento.

Oltre al tipico trasformatore con un avvolgimento primario e un avvolgimento secondario (▸ ***Fig. 15.2a***), vengono utilizzati anche trasformatori a più secondari (▸ ***Fig. 15.2b***) per ottenere tensioni diverse e a presa centrale (▸ ***Fig. 15.2c***), caratterizzati da due tensioni al secondario di uguale ampiezza ma di sfasamento opposto.

Circuito raddrizzatore

Un circuito raddrizzatore provvede a rendere unidirezionale la corrente in un carico generando una tensione di uscita pulsante. Nelle applicazioni elettroniche viene usato come elemento raddrizzatore il **diodo semiconduttore**, che ha la proprietà di condurre la corrente elettrica solo quando viene polarizzato direttamente. Ricordiamo che un diodo è polarizzato direttamente quando l'anodo si trova a un potenziale maggiore rispetto al catodo e a un valore tale da superare il valore di soglia.

La ***figura 15.3*** mostra alcune configurazioni tipiche di circuiti raddrizzatori monofase:

— **a semionda**, il diodo conduce solo per mezza semionda e la tensione inversa applicata al diodo è pari al valore massimo della tensione di ingresso;
— **a onda intera con presa centrale**, il diodo D1 conduce per la semionda positiva, mentre il diodo D2 conduce per la semionda negativa; la tensione inversa applicata a ogni diodo è pari al doppio della tensione massima di ingresso;
— **a onda intera a ponte** (ponte di Graetz), i diodi D1 e D3 conducono per la semionda positiva, i diodi D2 e D4 per quella negativa, e la tensione massima inversa è pari alla tensione massima; questa configurazione circuitale è realizzata anche in forma integrata.

I parametri caratteristici del raddrizzatore sono:
— tensione inversa massima di picco V_{RM}, è la massima tensione che può essere applicata al raddrizzatore quando viene polarizzato inversamente;
— corrente di picco non ripetitiva I_{FSM}, è la corrente massima che il raddrizzatore può fornire solo per un breve intervallo di tempo;

— corrente di picco ripetitiva I_{FRM}, è la corrente impulsiva massima che il raddrizzatore può fornire con continuità;
— corrente massima diretta I_{FM}, è la corrente massima che può scorrere nel raddrizzatore (dipende dal tipo di filtro di livellamento impiegato);
— corrente media raddrizzata $I_{FM(AV)}$, è il valore medio di corrente che può scorrere nel raddrizzatore senza che si verifichino fenomeni di riscaldamento che ne alterino o danneggino il funzionamento; in genere il suo valore è posto uguale a quello della corrente massima di uscita dell'alimentatore.

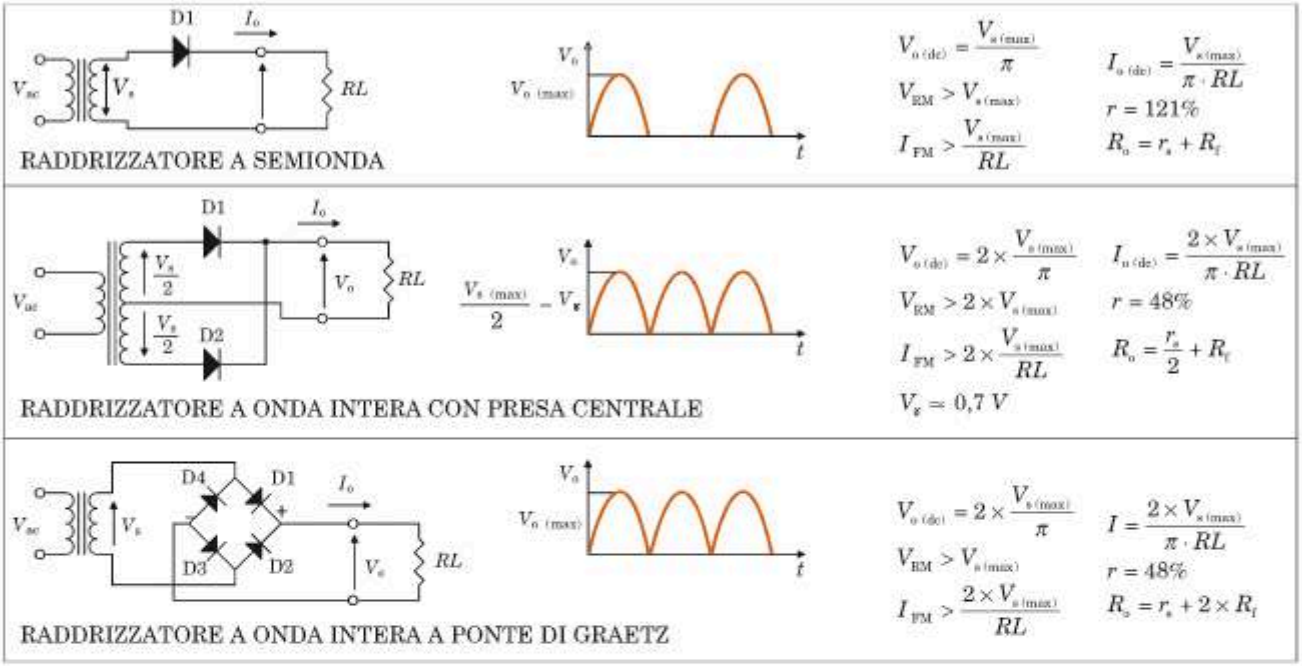


Fig. 15.3
Tipi di raddrizzamento con formule per il dimensionamento dei diodi rettificatori.

- $V_{s\,(max)}$ ampiezza della tensione di ingresso
- $V_{o\,(dc)}$ valore medio della tensione di uscita
- $I_{o\,(dc)}$ valore medio della corrente di uscita
- V_{RM} massima tensione inversa del diodo
- V_g tensione di soglia del diodo
- I_{FM} massima corrente diretta del diodo
- r_s resistenza del secondario
- R_f resistenza diretta del diodo
- r fattore di ondulazione (ripple)
- $V_{s\,(max)} = V_{s\,(eff)} \cdot \sqrt{2}$

Filtro di livellamento

Il segnale generato all'uscita del raddrizzatore a ponte ha un andamento pulsante; rispetto al valore medio presenta variazioni della forma d'onda dette **ondulazioni residue** (ripple). Negli alimentatori tale ondulazione viene espressa dal fattore di ondulazione residua (**fattore di ripple**), dato dal rapporto fra il valore efficace della componente alternata del segnale ($V_{r(eff)}$) e il valore medio in continua del segnale stesso (in %).

Il fattore di ripple r è dato da:

$$r = \frac{V_{r(eff)}}{V_{dc}} \qquad 15.1$$

Se è possibile linearizzare la forma d'onda della scarica esponenziale con un andamento triangolare, la tensione di ripple ($V_{r(eff)}$) vale:

$$r = \frac{V_{rpp}}{2\sqrt{3}} \qquad 15.2$$

dove:

V_{rpp} è la tensione di ripple picco-picco

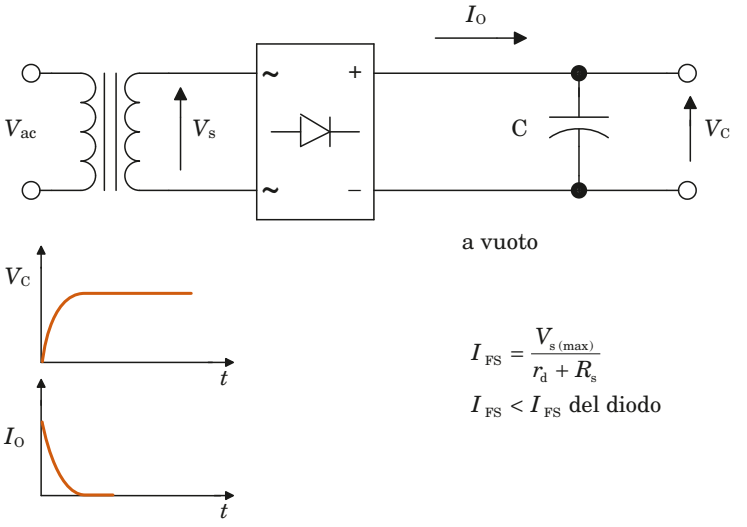
Negli alimentatori stabilizzati questo fenomeno è indesiderato e dev'essere ridotto il più possibile mediante l'uso di un filtro di livellamento che accumula energia quando la corrente aumenta e, quando la corrente diminuisce, non potendosi scaricare sul raddrizzatore restituisce l'energia accumulata fornendo corrente al carico in uscita, e quindi smorzando l'oscillazione della corrente in uscita.

Il filtro di livellamento può essere a ingresso induttivo o a ingresso capacitivo. Il **filtro a ingresso induttivo** (bobina di arresto) è formato da una rete L-C; il **filtro a ingresso capacitivo** è formato da una rete R-C o solo da un condensatore.

Il filtro di livellamento delle ***figure 15.4a, b*** è a ingresso capacitivo; quando viene applicata la tensione al primario del trasformatore, il condensatore si carica e la corrente assume un valore inizialmente elevato che va poi decrescendo mano a mano che la carica procede fino ad annullarsi. Si crea un picco di corrente la cui ampiezza dipende dalla tensione, massima al secondario, e dalla somma della resistenza differenziale del diodo (r_d) e della resistenza dell'avvolgimento secondario (R_{ds}). La durata dell'impulso di corrente si esaurisce più o meno rapidamente in funzione della quantità di cariche richiesta dalla carica del condensatore.

Figg. 15.4a, b
Filtro di livellamento:
a. schema elettrico;
b. forme d'onda.

I_{FS} corrente di picco non ripetitiva
I_O corrente di uscita



15.4a

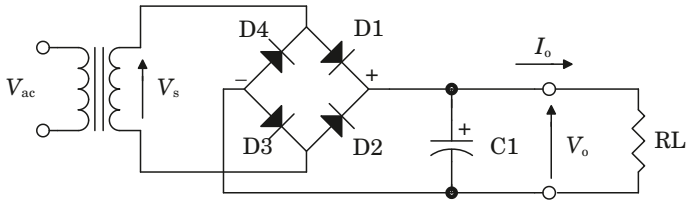
15.4b

Le ***figure 15.5a, b*** mostrano in che modo le forme d'onda vengono modificate quando l'alimentatore fornisce corrente al carico. Inizialmente il condensatore si carica al valore massimo generando un picco di corrente non ripetitivo; successivamente la tensione pulsante diminuisce e il condensatore si scarica con una costante di tempo $\tau = R_L \cdot C$ e nei diodi, polarizzati inversamente, non circola corrente. Quando la tensione sul condensatore diminuisce fino a un valore tale da ripolarizzare direttamente i diodi del ponte, questi ultimi entrano in conduzione e ricaricano il condensatore al valore massimo, e il ciclo si ripete.

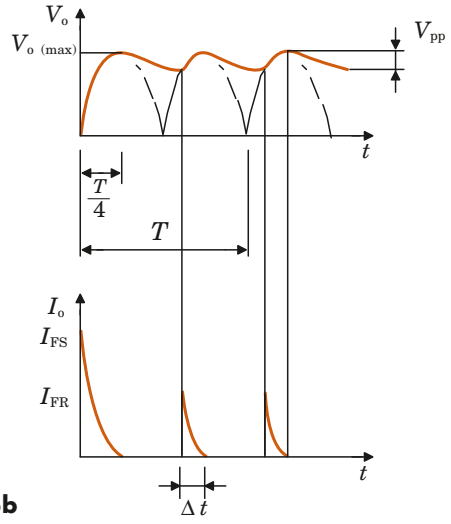
Il picco di corrente ripetitivo, generato in corrispondenza della fase di ricarica del condensatore, è di ampiezza tanto maggiore quanto minore è l'intervallo di carica (Δt), che a sua volta è tanto più lungo quanto più elevato è il valore del condensatore. Per ridurre l'ampiezza del picco iniziale si può aggiungere un resistore addizionale realizzando un filtro R-C, una soluzione che comporta un peggioramento del rendimento dell'alimentatore ed

è inoltre utilizzabile solo per valori della corrente di carico limitati, in quanto la dissipazione di potenza della resistenza tende a essere troppo elevata.

Per ottenere bassi valori di ondulazione residua il valore del condensatore dovrebbe essere molto elevato, ma ciò comporta la generazione di picchi di corrente iniziale di maggiore durata, e di conseguenza i diodi dovranno essere caratterizzati da un valore di corrente di picco non ripetitiva (I_{FSM}) elevata. Per evitare di impiegare diodi troppo costosi si accetta un valore di ondulazione residua più elevato e si lascia allo stadio stabilizzatore dell'alimentatore il compito di ridurlo, oppure si utilizza un filtro R-C. Per limitare l'ampiezza di questo picco si può utilizzare il filtro induttivo, che però richiede un'induttanza di valore elevato ottenibile utilizzando induttori avvolti su un nucleo ferromagnetico (**bobina di arresto**). Questi componenti sono pesanti, ingombranti e costosi. Nel filtro induttivo la corrente circola con continuità senza picchi di corrente e la resistenza serie dell'induttanza causa una caduta di tensione che riduce il valore della tensione di uscita sul carico rispetto a quella in uscita del raddrizzatore, riducendo il rendimento dell'alimentatore.



15.5a



15.5b

Figg. 15.5a, b
Forme d'onda di uscita del filtro di livellamento quando fornisce corrente al carico:
a. schema elettrico;
b. forme d'onda ed equazioni di dimensionamento.

T periodo della tensione applicata al primario del trasformatore alla frequenza di rete $f = 50$ Hz; $T = 20$ ms
I_{FS} corrente di picco non ripetitiva
I_{FR} corrente di picco ripetitiva

Valore medio:

$$V_m = V_{o\,(max)} - \frac{I_o}{4 \cdot f \cdot C}$$

Resistenza di uscita:

$$R_o = \frac{1}{4 \cdot f \cdot C}$$

Impedenza di uscita:

$$Z_o = X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Corrente massima nei diodi:

$$I_{D\,max} = V_{s\,(max)} \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{f \cdot C}{RL}}$$

Ripple:

$$r = \frac{2900}{C \cdot RL}$$

Il picco di corrente sovraccarica anche i diodi raddrizzatori, l'interruttore di rete posto sul primario del trasformatore e il fusibile di protezione (quando è presente); se quest'ultimo è del tipo rapido si può interrompere come conseguenza della sola accensione dell'alimentatore. Il rimedio più sicuro, volendo mantenere massimo il rendimento dell'alimentatore e non utilizzare bobine di arresto, è quello di sovradimensionare i vari componenti e inserire un fusibile ritardato.

I condensatori utilizzati come filtri di livellamento sono, al di sotto dei 400 V_I, sempre del tipo elettrolitico. Il dimensionamento degli elementi

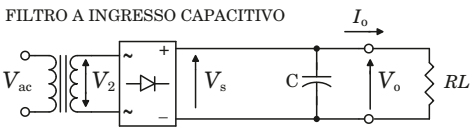
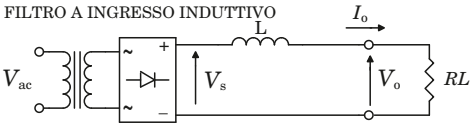
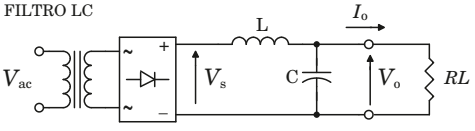
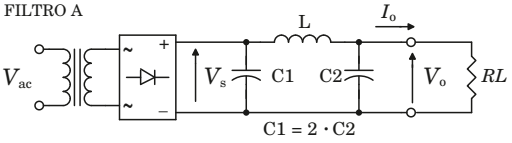
FILTRO A INGRESSO CAPACITIVO 	$V_{o\,(dc)} = V_{s\,(max)} - \dfrac{I_o}{4\,f \cdot C}$ $R_o = \dfrac{1}{4\,f \cdot C}$ $Z_o \cong X_C = \dfrac{1}{w \cdot C}$	$I_{D\,(max)} = V_{s\,(max)} \cdot \pi \cdot \sqrt{\dfrac{f \cdot C}{RL}}$ $\text{ripple} = \dfrac{2,9}{C \cdot RL}$
FILTRO A INGRESSO INDUTTIVO 	$V_{o\,(dc)} = 2\,\dfrac{V_{s\,(max)}}{\pi}$ $R_o = 2\,r_d + r_s + R_{ind}$ $Z_o \cong X_L = 2\,\pi \cdot f \cdot L$	$I_{D\,(max)} = 2\,I_o$ $\text{ripple} = \dfrac{RL}{3\sqrt{2}\,w\,L}$
FILTRO LC 	$V_{o\,(dc)} = \dfrac{V_{s\,(max)}}{\pi}$ $R_o = 2\,r_d + r_s + R_{ind}$ $Z_o \cong X_C = \dfrac{1}{w \cdot C}$	$I_{D\,(max)} = 2\,I_o$ $\text{ripple} = \dfrac{1,2}{L \cdot C}$
FILTRO A 	$V_{odc} = V_{s\,(max)} \cdot \dfrac{I_o}{4\,f \cdot C1} - R_{ind} \cdot I_o$ $R_o = \dfrac{1}{4\,f \cdot C1} + R_{ind}$ $Z_o \cong X_{C2} = \dfrac{1}{w \cdot C2}$	$I_{D\,(max)} = 2\,I_o$ $\text{ripple} = \dfrac{5,7}{C1 \cdot C2 \cdot L \cdot RL}$

Fig. 15.6
Formule di dimensionamento dei filtri di livellamento.

- $V_{o\,(dc)}$ valore medio della tensione di uscita
- R_o resistenza di uscita
- Z_o impedenza di uscita
- $I_{D\,(max)}$ corrente diretta massima dei diodi
- V_D caduta di tensione diretta dei diodi
- $V_{s\,(max)}$ valore di picco della tensione raddrizzata
- RL in kΩ
- C in μF
- L in H

$V_{s\,(max)} = V_{s\,(eff)} \cdot \sqrt{2} - 2\,V_D$

del filtro di livellamento viene effettuato con le formule elencate nella ***figura 15.6***, imponendo il valore di ondulazione residua desiderato.

In molti casi il dimensionamento del condensatore è effettuato con una formula empirica che moltiplica la corrente di uscita massima $I_{0(max)}$ per un coefficiente:

$$C = 2000 \cdot I_{0(max)} \qquad \textbf{15.3}$$

Il condensatore comunque non dovrebbe mai essere inferiore a 1000 μF.

Regolatore di tensione

La stabilizzazione della tensione di rete viene ottenuta regolando la potenza trasferita dall'alimentatore al carico, in modo che in uscita la tensione rimanga costante per una certa variazione, prestabilita, della corrente di uscita. Il regolatore assolve il suo compito assorbendo le variazioni di tensione dovute alle variazioni delle condizioni di carico (**regolazione di carico**), alle fluttuazioni della tensione di ingresso (**regolazione di linea**) e alle variazioni della temperatura (▸ ***Fig. 15.7***).

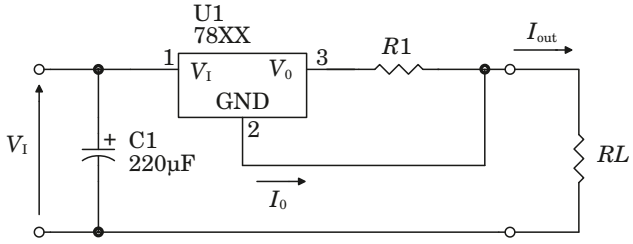
Fig. 15.7
Variazione della tensione di uscita in funzione delle variazioni della tensione di ingresso, del carico e della temperatura.

$$\Delta V_0 = S_V \Delta V_I - R_0 \Delta I_0 + S_T \Delta T$$

Fattore di stabilizzazione	$S_v = \dfrac{\Delta V_o}{\Delta V_I}$	con T = cost I_0 = cost
Resistenza interna	$R_0 = \dfrac{\Delta V_0}{\Delta V_0}$	con T = cost V_I = cost
Coefficiente di temperatura	$S_T = \dfrac{\Delta V_0}{\Delta T}$	con V = cost I_0 = cost

La potenza assorbita dal regolatore è però una potenza dissipata inutile, per cui quanto più basso è il suo valore tanto più efficiente è la regolazione. In qualche applicazione si desidera che sia costante la corrente di uscita e non la tensione: i circuiti che realizzano questa funzione sono detti **regolatori a corrente costante** e sono ottenuti da quelli a tensione costante con opportuni **schemi di collegamento** (▸ ***Fig. 15.8***). Gli alimentatori possono generare tensioni di uscita singole, positive o negative, o duali, di eguale o diverso valore. La regolazione della tensione di uscita si può ottenere con due schemi di collegamento: uno serie e uno parallelo.

Fig. 15.8
Regolatore di corrente.



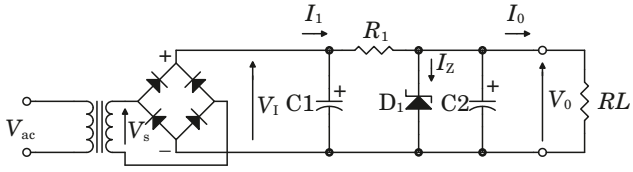
$$I_{out} = \frac{V_0}{R_1} + I_0$$

Regolatore di tipo parallelo

Quando l'elemento di regolazione è connesso in parallelo all'uscita effettua la regolazione assorbendo più o meno corrente, ossia cercando di opporsi alle variazioni di corrente avvenute nel circuito di carico o alle variazioni della tensione di ingresso.

Le ***figure 15.9a, b*** mostrano un alimentatore stabilizzato che utilizza un diodo Zener come elemento regolatore posto in parallelo al carico in uscita. L'elemento di regolazione dev'essere progettato in modo tale da sopportare, nel caso di funzionamento a vuoto (cioè senza carico) l'intera corrente di uscita. Il diodo Zener va mantenuto nella regione di breakdown, facendo in modo che la corrente che lo attraversa sia compresa fra il valore minimo ($I_{z(min)}$) e il valore massimo ($I_{0(max)}$), mediante un opportuno dimensionamento della resistenza di limitazione $R1$.

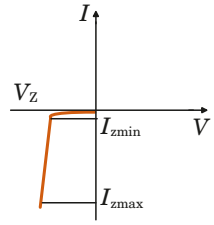
Figg. 15.9a, b
Alimentatore stabilizzato con elemento di regolazione parallelo:
a. schema elettrico;
b. forme d'onda.



$$P_{DZ\,(max)} > V_Z \cdot (I_{o(max)} + I_{Z(min)})$$

$$I_{Z(min)} > \frac{P_{DZ\,(max)}}{V_Z}$$ del diodo Zener

15.9a



15.9b

La ***figura 15.10*** mostra lo schema di dimensionamento del regolatore parallelo realizzato con il diodo Zener.

La tensione di ingresso va calcolata in modo che l'ondulazione residua non porti la tensione di uscita dell'alimentatore al di sotto del valore desiderato. La potenza del trasformatore dev'essere aumentata di un coefficiente di sicurezza per evitare di impiegarlo ai valori limite e, quindi, di surriscaldarlo.

Regolatore di tipo serie

Gli alimentatori di tipo parallelo presentano l'inconveniente di poter erogare in uscita solo bassi valori di corrente, e quindi di poter controllare solo escursioni del carico limitate; i regolatori di tipo serie non presentano questa limitazione.

SPECIFICHE DI PROGETTO: V_0 TENSIONE DI USCITA; $I_{0\,(max)}$ CORRENTE DI USCITA MASSIMA; V_{pp} ONDULAZIONE RESIDUA MASSIMA

Tensione di ingresso	$V_I = V_0 + \alpha$ con $\alpha = 0{,}2 \div 1$	$\alpha = \frac{\Delta V_0}{V_0} = V_{pp}$ ondulazione residua
Tensione efficace al secondario del trasformatore	$V_S = \frac{V_I + 2 \cdot V_D}{\sqrt{2}}$	V_D è la tensione di soglia di un diodo del ponte
Potenza del trasformatore	$P_{D\,calc} = V_S \cdot I$ $P_{D\,reale} = \beta \cdot P_{D\,calc}$ con $\beta = 1{,}2 \div 1{,}5$	normalizzare i valori di V_S e P_D reale e ricalcolare V_I
Condensatore di livellamento (C_1)	$C_1 = 2000 \times I_{0\,(max)}$	$C_{1\,min} = 1000\ \mu F$
Condensatore (C_2)	$C_2 \cong \frac{1}{2} C_1$	$200 < C_2 < 1000\ \mu F$
Diodo Zener	$V_z = V_0$ $I_{z\,(max)} > I_{0\,(max)}$ $P_{Dz\,(max)} \geq V_z \cdot (I_{0\,(max)} + I_{z\,(min)})$	
Resistenza di limitazione (R_1)	$I_{0\,(max)} + I_{z\,(min)} < I_1 < I_{z\,(max)} = \frac{P_{Dz}}{V_z}$ scelto $R_1 = \frac{V_{I\,(max)} - V_z}{I_1}$	

Fig. 15.10
Dimensionamento di un regolatore parallelo a diodo Zener.

Con l'elemento di regolazione connesso in serie, la regolazione viene effettuata per mezzo di opportune variazioni della caduta di tensione ai suoi capi. Il circuito di stabilizzazione misura il valore della tensione di uscita, lo confronta con una tensione di riferimento costante e utilizza il segnale di errore per modificare le caratteristiche di conduzione, e quindi la caduta di tensione ai capi dell'elemento di regolazione, in modo da annullare la differenza fra la tensione di uscita e quella di riferimento. Questo tipo di stabilizzazione richiede che la tensione di ingresso sia sempre maggiore di quella di uscita. La ***figura 15.11*** mostra lo schema tipico di un alimentatore lineare stabilizzato. Lo schema a blocchi include anche una serie di blocchi di controllo che servono per migliorare le prestazioni e l'integrità dello stabilizzatore in presenza di forti variazioni del carico applicato in uscita (parleremo di questi blocchi in seguito).

Il regolatore di tensione confronta una porzione della tensione di uscita, prelevata per mezzo del partitore resistivo *R*2-*R*3, con la tensione di riferimento. In presenza di un segnale di errore (di una variazione, cioè, del segnale di uscita), il segnale di uscita aumenta o diminuisce la corrente di polarizzazione dei transistor di regolazione Q1 e Q2. Si ha quindi una variazione della caduta di potenziale fra collettore ed emettitore del transistor in serie con l'uscita Q2, tale da provocare una diminuzione o un aumento della tensione di uscita che si opponga alla variazione che ha originato il segnale di errore. Il blocco limitazione di corrente campiona il valore della corrente di uscita sulla resistenza *R*1 e blocca, interdi-

cendo i transistor Q1 e Q2, l'erogazione di potenza dall'alimentatore quando la corrente richiesta dal carico supera un valore massimo. Il modo in cui la limitazione di corrente interviene viene di norma descritto con la curva tensione-corrente di uscita. Due sono le soluzioni possibili.

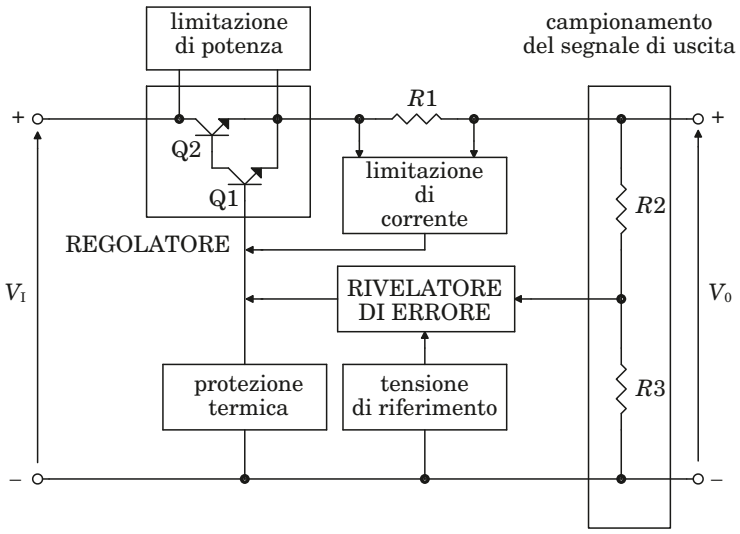
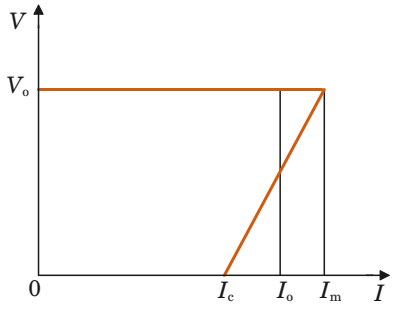
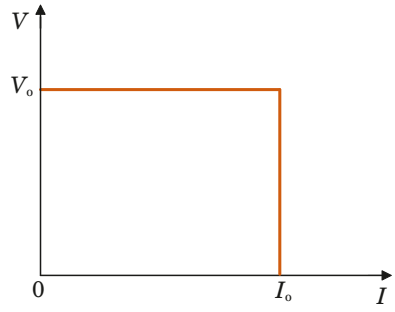


Fig. 15.11
Schema a blocchi di un regolatore di tensione.

1. La soluzione detta **di fold-back** presenta una caratteristica trapezoidale (▸ ***Fig. 15.12a***); come nel caso precedente, la limitazione di corrente interviene a un valore di corrente di uscita superiore a quello massimo erogabile, ma in presenza di cortocircuito la corrente diminuisce a un valore inferiore a quello della corrente massima di funzionamento, riducendo le perdite di potenza nel transistor di regolazione. La resistenza $R1$ di shunt dev'essere di basso valore per non alterare il rendimento dell'alimentatore, che è dato dal rapporto tra la potenza disponibile in uscita e quella fornita in ingresso. Il circuito di protezione termica e il circuito di limitazione di potenza controllano, in modo analogo al circuito di limitazione di corrente, che non vengano raggiunti valori di temperatura tali da danneggiare i componenti del circuito.
2. La soluzione detta **a corrente costante** (▸ ***Fig. 15.12b***) comporta che in presenza di un cortocircuito in uscita (resistenza di carico nulla), e quindi con tensione di uscita nulla, circoli una corrente costante pari a quella di intervento del circuito di limitazione (caratteristica rettangolare). Il valore da assegnare alla corrente di limitazione dev'essere sempre maggiore della corrente massima di utilizzo specificata per l'alimentatore che, essendo una specifica di progetto, dev'essere comunque erogabile.



15.12a

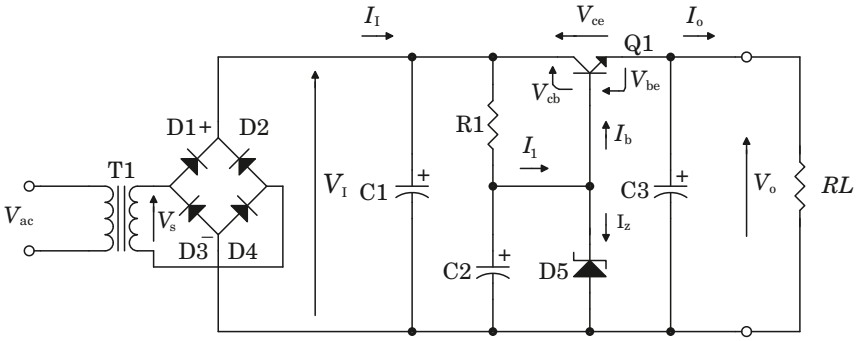


15.12b

Figg. 15.12a, b
Curve di limitazione di corrente:
a. caratteristica trapezoidale;
b. caratteristica rettangolare.

Il regolatore serie proposto nella ***figura 15.13*** effettua la regolazione della tensione di uscita modificando la conduzione del transistor (connesso nella configurazione circuitale a inseguitore o *emitter follower*) in funzione delle variazioni della tensione V_{be} dovute a quelle della tensione di uscita; il diodo Zener fornisce la tensione di riferimento. Il segnale di errore che modula la conduzione è quindi pari alla variazione del segnale di uscita.

Fig. 15.13
Regolatori di tensione serie con transistor bipolare.



La variazione della tensione di ingresso provoca una variazione della corrente di ingresso I_i che viene assorbita dal ramo di regolazione parallelo $R1$ del diodo Zener. La resistenza $R1$ serve per polarizzare correttamente il diodo Zener nella zona di breakdown. Il condensatore C2 riduce l'ondulazione residua del segnale di ingresso applicato al diodo Zener: il suo valore è di solito 1/10 di quello del condensatore di livellamento. La ***figura 15.14*** mostra lo schema di dimensionamento dell'alimentatore presentato nella figura 15.13.

Fig. 15.14
Dimensionamento di un regolatore serie.

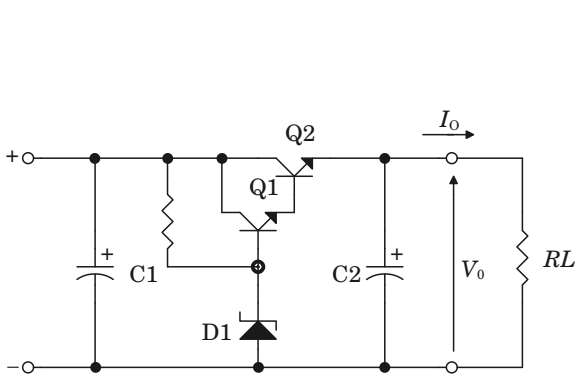
SPECIFICHE DI PROGETTO: V_0 TENSIONE DI USCITA; $I_{0\,(max)}$ CORRENTE DI USCITA MASSIMA; V_I TENSIONE DI INGRESSO

Transistor di regolazione serie	Criterio di selezione: $P_D = (V_{I\,(max)} - V_0) \cdot I_{0\,(max)}$ $I_C > I_{0\,(max)}$ $V_{CE} \geq V_{I\,(max)}$ Scelto il transistor si calcola: $I_{B\,(max)} = \frac{I_{0\,(max)}}{h_{FE\,(min)}}$
Diodo Zener	$V_Z = V_0 + V_{be}$ $I_z \geq I_{B\,(max)} + I_{z\,(min)}$ $P_{Dz} \geq V_z \cdot (I_{B\,(max)} + I_{z\,(min)})$
Resistenza di limitazione (R1)	$I_{B\,(max)} + I_{z\,(min)} < I_1 < I_{z\,(max)} =$ $= \frac{P_{Dz}}{V_z}$ scelto $R_1 = \frac{V_{I\,(max)} - V_z}{I_1}$

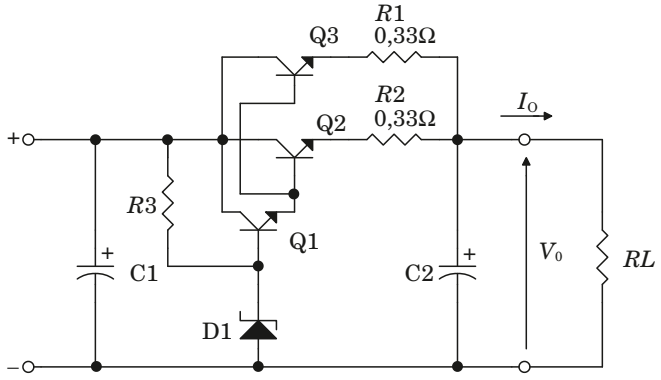
Se l'alimentatore serie deve erogare una corrente elevata, il transistor di regolazione può essere sostituito da due transistor in connessione Darlington (▸ ***Fig. 15.15a***). Il transistor di regolazione è sottoposto a una forte dissipazione di potenza che difficilmente può sopportare da solo. Nella ***figura 15.15b*** è proposta una soluzione tecnica che prevede la con-

Figg. 15.15a, b
Regolatore di tensione serie per correnti elevate:
a. connessione Darlington;
b. connessione con transistor in parallelo.

nessione in parallelo di più transistor che si suddividono la corrente circolante. Le resistenze $R1$ e $R2$ equalizzano le correnti nei due rami bilanciando le eventuali differenze di tensione base emettitore V_{be} dei due transistor. Se un transistor presenta una V_{be} maggiore, tende a condurre una corrente maggiore provocando un aumento della caduta di tensione sulla resistenza di equalizzazione, e quindi una diminuzione della V_{be} stessa.



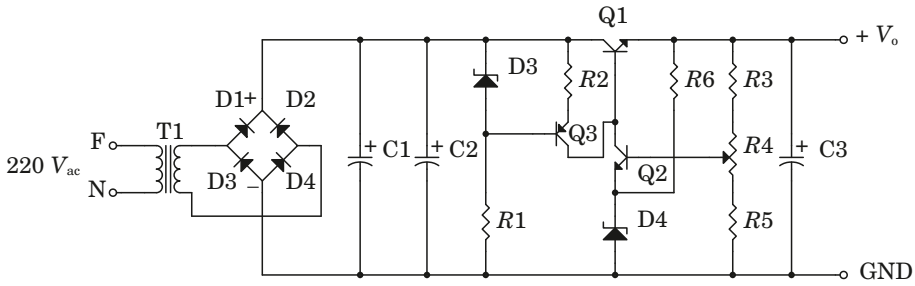
15.15a



15.15b

Nell'alimentatore serie proposto nella ***figura 15.16*** il confronto fra tensione di riferimento e tensione di uscita viene effettuato dal transistor Q2 che, grazie alle sue caratteristiche di amplificazione, permette di ottenere in uscita una tensione variabile da un valore minimo pari alla tensione di Zener fino a un valore massimo regolabile con il potenziometro $R4$.

Fig. 15.16
Regolatore di tensione serie con nodo di confronto realizzato con transistor bipolare.



Il preregolatore è costituito da un generatore di corrente costante che assorbe le variazioni della tensione di ingresso, anche quelle dovute alla tensione di ripple. Il circuito è un generatore di corrente continua, in quanto la corrente di collettore in uscita, se la corrente di base è trascurabile ($h_{FEQ1} > 50$), è uguale a quella di emettitore e data da:

$$I_C = \frac{V_z - V_{be}}{R2} \qquad 15.4$$

Dal punto di vista della stabilizzazione termica, il coefficiente di temperatura delle resistenze $R3$, $R4$, $R5$ dev'essere lo stesso, e quello del diodo Zener dev'essere positivo e dello stesso valore (circa 2,5 mV/°C) di quello negativo della giunzione base-emettitore del transistor Q2.

A queste configurazioni fondamentali occorrerebbe ora aggiungere tutti i circuiti di protezione che abbiamo descritto in precedenza, ma non lo riteniamo utile perché le tecnologie più recenti hanno reso obsoleto questo approccio al progetto degli alimentatori.

I circuiti di controllo che permettono di modificare la conduzione del regolatore serie e di proteggere i vari elementi circuitali sono realizzati ormai da due decenni con microcircuiti che hanno già risolto in modo ottimale tutte le problematiche connesse al progetto degli alimentatori lineari stabilizzati. Il progettista, in pratica, determina solo le caratteristiche di ingresso, di uscita, di regolazione e di ondulazione dell'alimentatore che desidera realizzare, e quindi sceglie il microcircuito più adatto. L'alimentatore così realizzato avrà sicuramente un costo molto inferiore di una qualsiasi realizzazione a componenti discreti e una maggiore affidabilità.

Lo stesso schema a blocchi proposto nella figura 15.11 non è altro che lo schema interno di un regolatore a tre terminali a tensione fissa.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Che cos'è un alimentatore lineare?
2. Qual è la funzione del trasformatore?
3. Qual è la funzione del raddrizzatore?
4. Quali parametri elettrici caratterizzano un alimentatore?
5. Che cos'è il fattore di ondulazione residua (ripple) e da che cosa è causato?
6. Qual è la funzione del filtro di livellamento?
7. Qual è la funzione del circuito stabilizzatore in un alimentatore?
8. Che cosa si intende per regolazione di carico e per regolazione di linea?
9. Descrivi le configurazioni circuitali di regolazione di tipo serie e di tipo parallelo.

2 REGOLATORI INTEGRATI

I regolatori utilizzati per realizzare alimentatori lineari stabilizzati si possono suddividere in:

1. positivi fissi a tre terminali;
2. negativi fissi a tre terminali;
3. positivi fissi regolabili a tre e quattro terminali;
4. negativi fissi regolabili a tre e quattro terminali;
5. multiterminali variabili di precisione;
6. a commutazione (*switching*).

I principali parametri da definire per effettuare la scelta del regolatore da utilizzare per realizzare un alimentatore lineare stabilizzato sono:

— il campo di variazione della tensione di ingresso entro cui la tensione di uscita deve mantenersi costante;
— il campo di variazione (il valore minimo e massimo) della tensione di uscita, se la tensione di uscita è regolabile;
— la tensione differenziale fra ingresso e uscita alla quale il regolatore opera correttamente, che è detta **tensione di dropout** (~ 2 V);
— la variazione della tensione di uscita (*line regulation*) ammessa per una variazione della tensione di ingresso, espressa in valore assoluto (mV) o in percentuale sul valore nominale;
— la variazione della tensione di uscita (*load regulation*) per una variazione della tensione di carico;

— la massima corrente di carico ammessa;
— la minima corrente di carico alla quale il regolatore funziona correttamente;
— il valore della corrente di limitazione e il tipo di limitazione desiderata (rettangolare, fold-back);
— l'ondulazione residua (ripple), ossia la componente alternata che è sovrapposta al segnale in corrente continua di uscita, espressa come variazione percentuale della tensione di uscita.

Regolatori con tensione di uscita fissa e/o regolabile

La figura 15.11, che abbiamo utilizzato per descrivere un generico alimentatore, è anche lo schema a blocchi di un alimentatore monolitico a tre terminali. Tutto lo schema, compreso il transistor di regolazione, è racchiuso in un unico contenitore e al progettista non resta altro che aggiungere un paio di condensatori di bypass (▸ ***Fig. 15.17***).

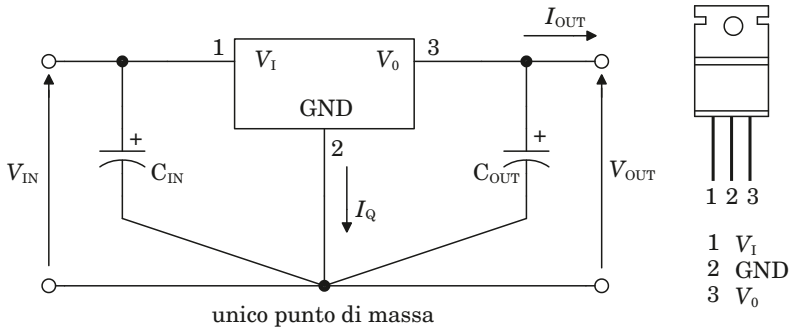


Fig. 15.17
Connessione con punto di massa comune di un regolatore a tre terminali.

In ingresso il condensatore è richiesto solo se il regolatore è posizionato sulla scheda di montaggio lontano dal condensatore di filtro (distanza maggiore di 5 cm). Di solito in uscita non sono richiesti condensatori di bypass, ma la loro presenza migliora il comportamento in transitorio del regolatore. Di norma si inseriscono in parallelo all'uscita del regolatore due condensatori, uno di tipo elettrolitico e di capacità di 10 ÷ 47 μF e uno di tipo non elettrolitico di circa 0,1 μF.

Le ***figure 15.18a-d*** mostrano le principali configurazioni con le relative formule di dimensionamento.

Nel circuito duale i due regolatori, quando vengono alimentati, raggiungono il valore nominale di tensione in tempi differenti: il più rapido potrebbe così danneggiare l'altro. L'inconveniente viene superato ponendo diodi polarizzati inversamente fra i terminali di uscita.

Affinché i regolatori funzionino correttamente è necessario che la tensione applicata dal circuito alimentatore all'ingresso dello stabilizzatore integrato sia maggiore della tensione di dropout e della tensione di uscita, e che non superi il valore massimo consentito. Se la massima tensione di ingresso viene superata, si può impiegare il circuito della ***figura 15.19***. La caduta di tensione sul transistor Q1 fa sì che la tensione in ingresso al regolatore sia ridotta al di sotto del valore massimo.

Il circuito della ***figura 15.20*** permette di ottenere in uscita una corrente molto superiore a quella erogabile dal regolatore. Il transistor viene scelto fra quelli che presentano un valore elevato di guadagno di corrente (h_{FE}) in modo che la corrente di base assuma un valore trascurabile rispet-

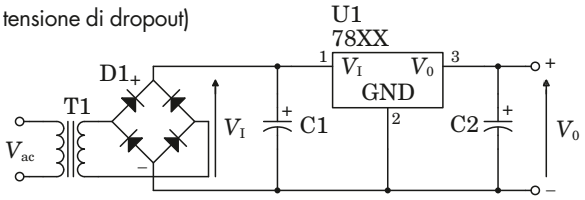
Figg. 15.18a-d
Regolatori a tre terminali a tensione fissa e variabile:
a. tensione di uscita fissa positiva;
b. tensione di uscita fissa negativa;
c. tensioni di uscita fisse, positiva e negativa;
d. tensione di uscita regolabile con partitore resistivo.

XX tensione di uscita del regolatore integrato
$V_I > V_0 + V_{do}$
(V_{do} = tensione di dropout)

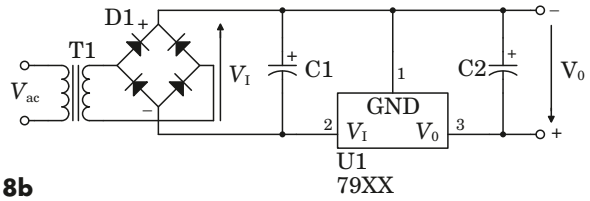
to a quella di collettore; si assume inoltre che la corrente I_q (*quiescent current*) del regolatore sia trascurabile.

La caduta di tensione ai capi della giunzione base-emettitore del transistor è compensata dalla caduta di tensione ai capi del diodo D1 polarizzato direttamente, per cui le resistenze $R1$ e $R2$ sono sottoposte alla stessa caduta di potenziale. Diminuendo in modo adeguato il valore delle due resistenze è possibile suddividere le correnti in modo che nel regolatore circoli una frazione della corrente di uscita compatibile con quella massima, e che la parte restante circoli nel transistor.

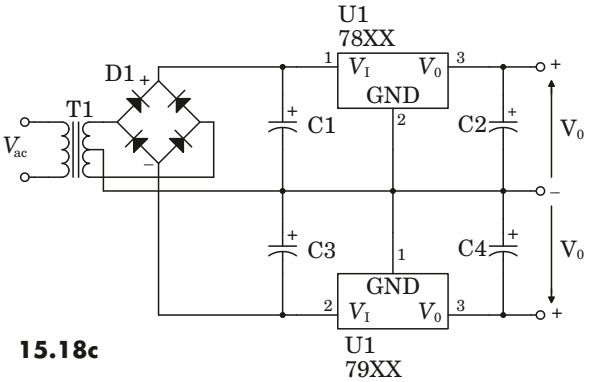
Le tensioni di uscita disponibili con questi dispositivi sono: 5, 6, 8, 10, 12, 15, 18, 24 V_{dc}. Le correnti di uscita dipendono dal tipo di contenitore e dal metodo scelto per lo smaltimento del calore sviluppato dal regolatore (conduzione, irraggiamento o convezione).



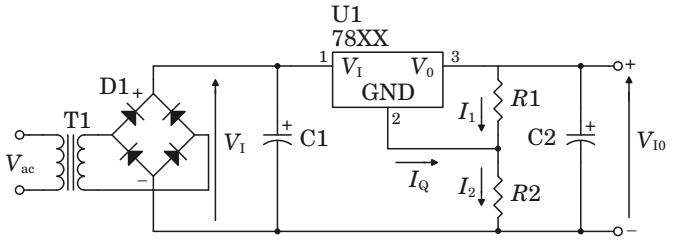
15.18a



15.18b



15.18c



15.18d

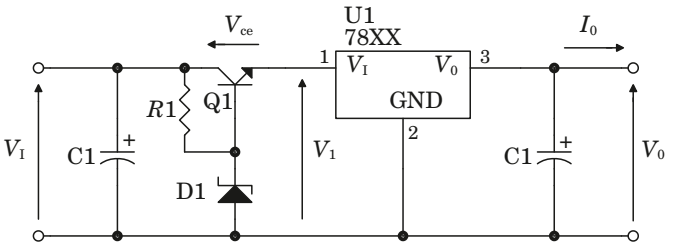
$$R_1 = \frac{V_{reg}}{I_1}$$

con $I_1 = I_Q$ (8 ÷ 10 mA)

$$R_2 = \frac{V_0 - V_{reg}}{2 \times I_Q}$$

I_Q quiescent current

Fig. 15.19
Configurazione circuitale che permette di utilizzare un regolatore a tre terminali alimentato da una tensione di ingresso superiore alla sua massima ammissibile.



$V_1 = V_I - V_{ce}$
tale che $V_{I\,(max)\ \text{del 78xx}} < V_1$

$Q_1 = I_{c\,(max)} > I$

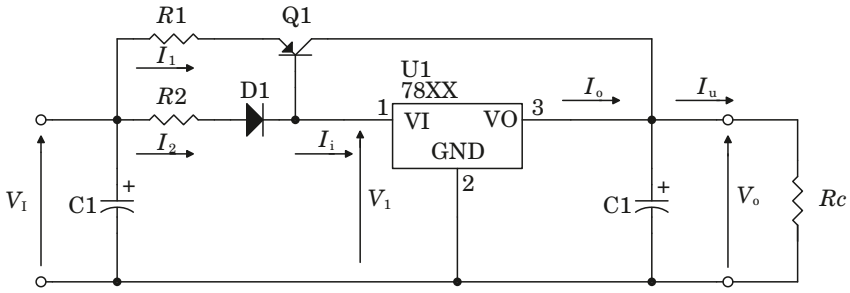


Fig. 15.20
Configurazione circuitale che utilizza un regolatore a tre terminali per ottenere una corrente di uscita maggiore di quella massima del regolatore.

a. $V_1 > V_{do} + V_0$

b. $R_{2(min)} = \dfrac{V_{I(max)} - V_1 - V_{D1}}{I_{0(max)}} \Rightarrow I_2 = I_i = \dfrac{V_{I(max)} - V_1 - V_{D1}}{R_{2(scelto)}} = I_0$

c. $R_1 = \dfrac{V_{I(max)} - V_1 - V_{be}}{I_{u(max)} - I_2}$

scelta del transistor Q_1 $\begin{cases} I_{c(max)} > I_{u(max)} - I_0 \\ V_{ce(max)} > V_{I(max)} - V_0 \\ P_{D(max)} > V_{ce} \cdot (I_{u(max)} - I_0) \\ h_{FE} > 50 \end{cases}$

Tipi di contenitore e sigla di identificazione

I regolatori utilizzano di norma i seguenti tipi di contenitore:
— plastico JEDEC TO-220, che eroga correnti di 100 mA ÷ 1,5 A;
— metallico JEDEC TO-3, che eroga correnti di 3 ÷ 10 A.

La sigla commerciale di identificazione più diffusa ha la struttura seguente.
— **Due cifre**:
78 regolatore a tensione di uscita positiva;
79 regolatore a tensione di uscita negativa.
— **Una o due lettere**:

L	corrente di uscita massima 100 mA;
M	corrente di uscita massima 500 mA;
nessuna lettera	corrente di uscita massima 1,5 A;
H	corrente di uscita massima 5 A;
P	corrente di uscita massima 10 A;
HG	corrente di uscita massima 5 A, regolabile.

— **Due cifre che indicano la tensione di uscita** generata dal regolatore; le tensioni di uscita (V_{dc}) disponibili sono:
05, 06, 08, 10, 12, 15, 18, 24.

ESEMPIO 1

IDENTIFICAZIONE DEL REGOLATORE

Le cifre 7805 indicano:
un regolatore di tensione positivo con tensione di uscita di + 5 V e corrente di uscita massima di 1,5 A se il contenitore è del tipo JEDEC TO-3.

Le cifre 79L12 indicano:
un regolatore di tensione negativo con tensione di uscita di – 12 V e corrente di uscita massima di 0,1 A.

Regolatori multiterminali

I regolatori multiterminali sono dei circuiti alimentatori realizzati in forma integrata che, a differenza dei regolatori a tensione fissa, permettono l'accesso alle varie parti funzionali interne dell'anello di regolazione. Con questo microcircuito è quindi possibile ottenere un alimentatore che abbia le caratteristiche desiderate aggiungendo solo pochi componenti discreti esterni ed effettuando calcoli di dimensionamento molto semplici.

Questi circuiti contengono, oltre ai dispositivi di regolazione, i circuiti di protezione sia termici sia di massima corrente dell'alimentatore. I limiti di massima corrente possono essere scelti dall'utilizzatore in funzione dell'applicazione, calcolando correttamente la resistenza di campionamento della corrente di uscita.

Un tipico regolatore multiterminale è il tipo 723; la ***figura 15.21*** mostra il suo schema funzionale. Il regolatore contiene: un generatore di tensione di riferimento, un amplificatore di errore, un circuito per la limitazione della corrente (Q1) e l'elemento regolatore serie (Q2). Sono quindi presenti tutti gli elementi funzionali necessari per progettare un alimentatore; è poi compito del progettista aggiungere i componenti discreti che realizzano l'alimentatore con le caratteristiche di uscita richieste.

Le principali caratteristiche elettriche del microcircuito 723 sono:

— tensione di ingresso, V_i (V^+/pin 12), compresa fra 9,5 e 40 V;
— tensione di uscita ottenibile, V_{io} (pin 10), compresa fra 2 e 37 V;
— tensione differenziale massima, $V_i - V_o$, di 40 V;
— tensione di riferimento, V_{iref} (pin 6), con un valore tipico di 2,17 V;
— corrente massima di uscita di 150 mA;
— corrente generata dal generatore di tensione di riferimento massima di 15 mA.

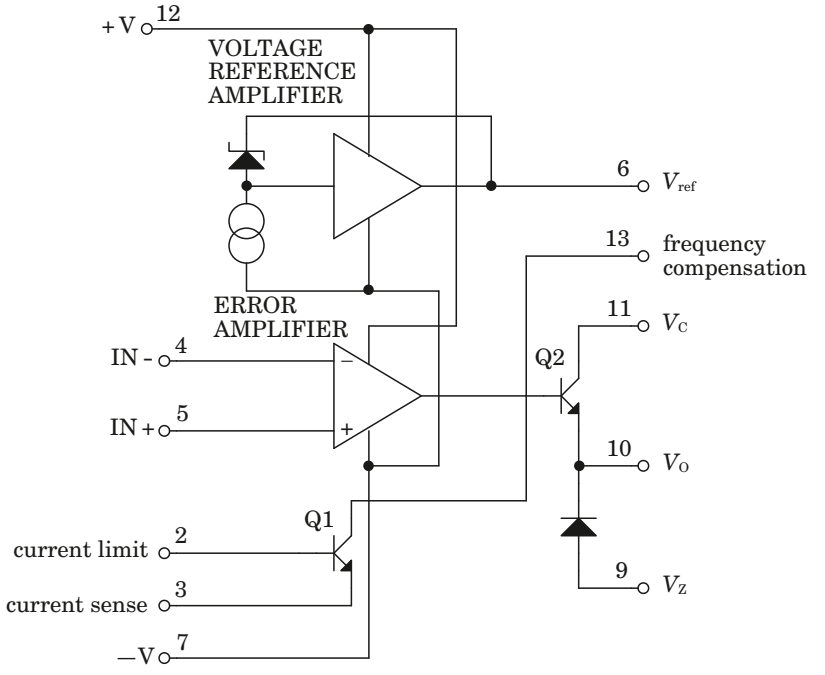


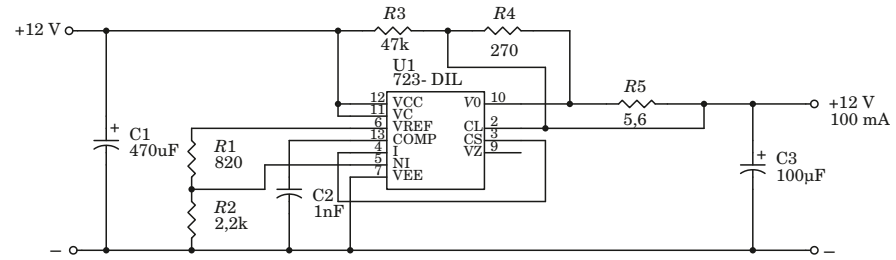
Fig. 15.21
Circuito equivalente del microcircuito 723, regolatore di tensione di precisione.

Le ***figure 15.22a, b*** mostrano due alimentatori che utilizzano questo microcircuito come elemento funzionale fondamentale. Il primo alimentatore genera in uscita una tensione di + 12 V con una corrente di uscita massima di 100 mA.

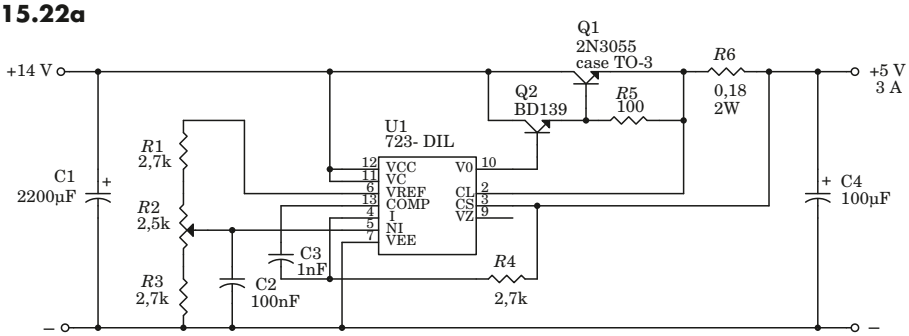
Figg. 15.22a, b
Alimentatori che utilizzano il circuito integrato multiterminale 723:

a. alimentatore che genera una tensione di uscita di 12 V ed eroga una corrente di 100 mA;

b. alimentatore che genera una tensione di uscita di + 5 V ed eroga una corrente di 3A.



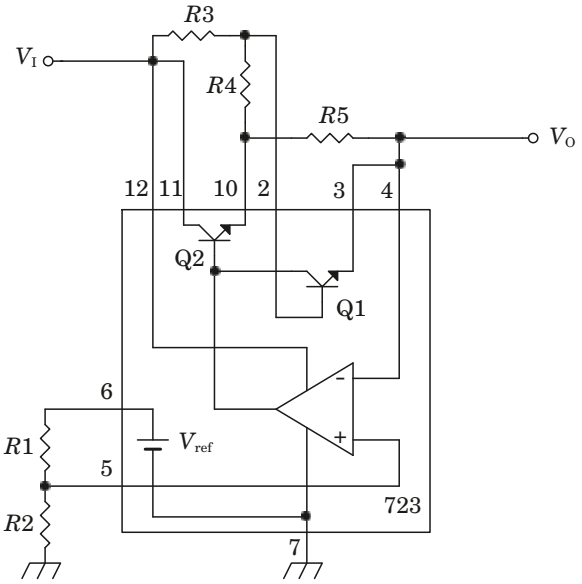
15.22a



15.22b

Per facilitare la comprensione del circuito, nella ***figura 15.23*** è proposto l'alimentatore con il circuito interno del microcircuito integrato disegnato in modo da evidenziare le diverse parti funzionali. Se confrontiamo questo circuito con il modello teorico proposto nella figura 15.11, e con l'alimentatore a componenti discreti proposto nella figura 15.16, appare chiaro il vantaggio pratico offerto da un microcircuito multiterminale.

Fig. 15.23
Schema applicativo con regolatore multiterminale 723.



Dall'analisi dello schema si deduce che la tensione di uscita è determinata dal partitore di tensione formato dalle resistenze $R1$-$R2$. La tensione applicata al morsetto non invertente dell'amplificatore d'errore è data dall'equazione che segue:

$$V_{ni} = \frac{R2}{R1 + R2} \cdot V_{ref} \qquad 15.5$$

Per una regolazione più esatta della tensione in uscita, una delle due resistenze fisse dovrebbe essere sostituita con una variabile. La resistenza $R5$ definisce il valore di corrente al quale deve intervenire il circuito di limitazione della corrente di uscita.

La corrente massima viene calcolata con la seguente formula:

$$I_{sc} = \frac{V_{sense}}{R_{sc}} = \frac{0,66}{R_{sc}} \qquad 15.6$$

Nel circuito proposto $R_{sc} = R5$ vale 5,6 Ω. La limitazione di corrente avviene a 120 mA. Il circuito proposto nella ***figura 15.22b*** utilizza un gruppo di tre transistor (due esterni al microcircuito e uno interno) connessi secondo la configurazione Darlington, per controllare una corrente di carico elevata. Il trimmer $R2$ permette di effettuare la corretta calibrazione della tensione di uscita perché consente di variare il valore della tensione di riferimento applicata al morsetto non invertente dell'amplificatore di errore.

In commercio esistono molti tipi di regolatore multiterminale che presentano la stessa organizzazione circuitale del microcircuito 723, ma che ne migliorano alcune caratteristiche. Ne forniamo un breve elenco:

— L146 (SGS), è simile al 723 ma presenta una tensione massima di ingresso doppia (80 V);
— MC1466 (Motorola), può regolare sia la tensione di uscita sia la corrente.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Come vengono classificati i regolatori a circuito integrato?
2. Che cos'è la tensione di dropout?
3. Quali sono i valori della tensione di uscita dei regolatori a tre terminali? Per ogni tensione indica quali tipi di circuito di famiglie micrologiche possono utilizzarli.
4. Che cos'è un alimentatore duale?
5. Descrivi il regolatore di tensione multiterminale 723.

3 ALIMENTATORI A COMMUTAZIONE

Gli alimentatori a commutazione (▸ ***Fig. 15.24***) funzionano in base al seguente principio: un **generatore di impulsi** provoca periodicamente la chiusura e l'apertura di un interruttore S e consente di trasferire l'energia elettrica dal filtro di ingresso verso il filtro di uscita che la immagazzina. L'energia immagazzinata viene poi erogata al carico in uscita. La quantità di energia trasferita dipende dalla durata e dalla frequenza degli

impulsi applicati sull'interruttore S. Le frequenze di commutazione si trovano di norma al di là della soglia udibile per evitare fastidiosi ronzii che disturberebbero gli utenti delle apparecchiature; sono normali frequenze di commutazione comprese fra 20 e 50 kHz.

Il generatore di impulsi modulati in durata viene identificato nella letteratura tecnica con la sigla PWM. Il filtro di uscita è in genere un filtro L-C.

Questi alimentatori possono generare sia tensioni inferiori a quella di ingresso, e in questo caso sono detti **regolatori a riduzione** (*step-down switching regulator*), sia tensioni superiori, e in questo caso sono detti **regolatori a incremento** (*step-up switching regulator*). La tensione di uscita può essere positiva o negativa.

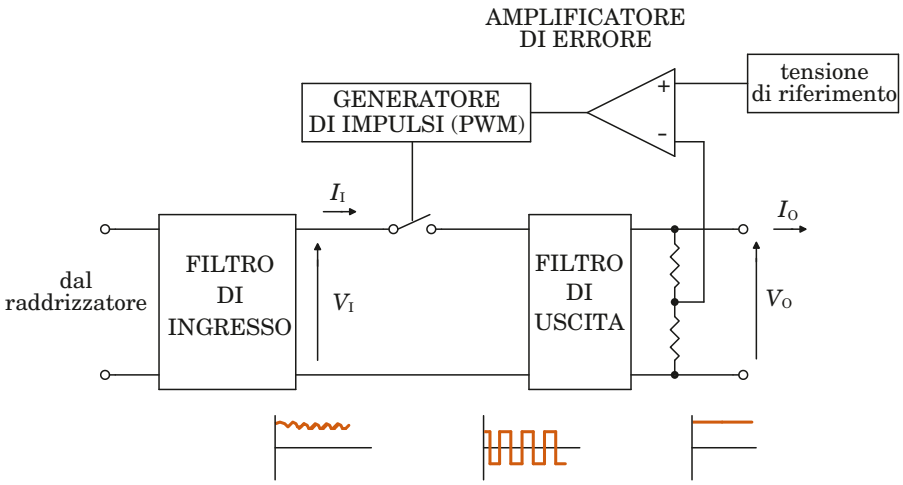


Fig. 15.24
Schema a blocchi di un alimentatore a commutazione.

Le ***figure 15.25a, b, c*** mostrano tre modelli che chiariscono il metodo di funzionamento di un alimentatore a commutazione. Tutti e tre i tipi di funzionamento si basano sull'accumulo di energia da parte dell'induttanza durante la fase in cui l'interruttore è chiuso, e sull'utilizzo di questa energia liberata dall'induttanza quando l'interruttore si apre.

Il primo modello (▸ ***Fig. 15.25a***) descrive un alimentatore a commutazione con tensione di uscita avente la stessa polarità di quella di ingresso ma di valore inferiore (*step-down switching regulator*). L'interruttore è costituito da transistor a commutazione veloce comandato da un oscillatore il cui periodo di oscillazione è controllato da un comparatore che fissa la tensione di soglia superiore a cui l'interruttore si deve aprire, e la tensione di soglia inferiore a cui si deve chiudere.

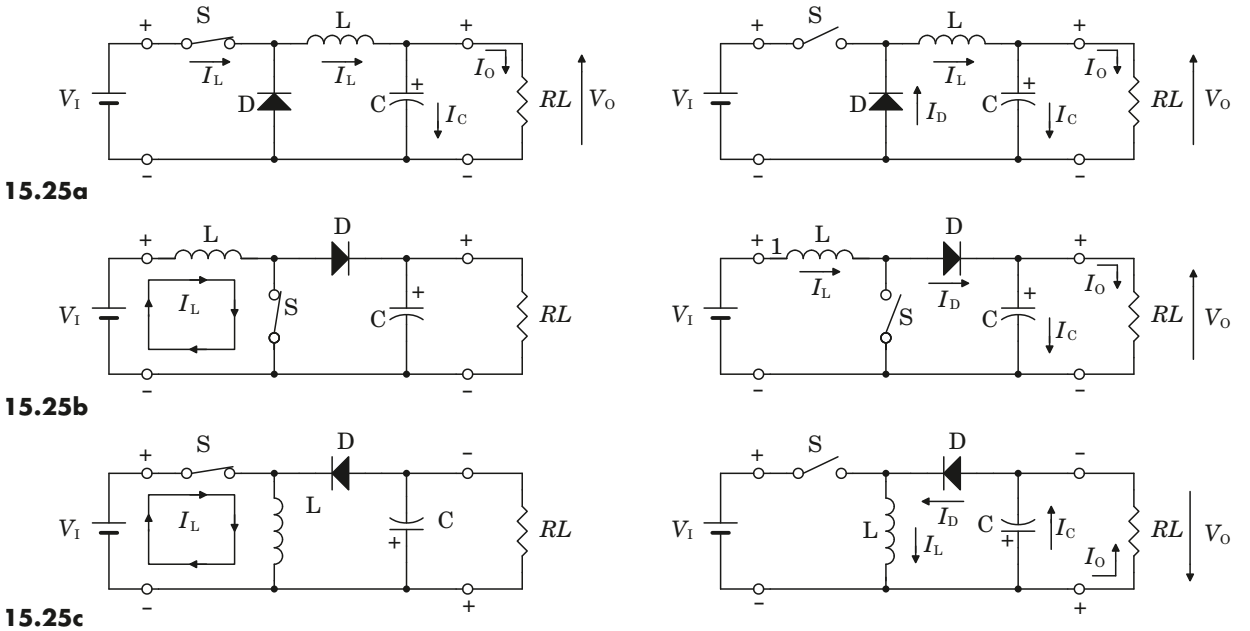
Supponiamo che sia l'induttanza sia il condensatore siano inizialmente scarichi. Quando l'interruttore viene chiuso, la tensione non regolata applicata in ingresso polarizza inversamente il diodo D: la corrente non assume immediatamente il valore massimo ma, a causa della presenza dell'induttanza, aumenta secondo una legge di variazione esponenziale caricando il condensatore C. La tensione di uscita aumenta secondo la legge di carica del condensatore. Quando questa tensione raggiunge il valore di soglia stabilito, l'interruttore si apre. Il flusso di corrente fornito in ingresso si blocca e l'induttanza restituisce l'energia accumulata generando una corrente che ora scorre attraverso il diodo D; il condensatore continua a caricarsi e la corrente continua a fluire nel carico. Quando la

corrente fornita dall'induttanza diventa inferiore a quella richiesta dal carico, è il condensatore a fornire la corrente necessaria al carico, scaricandosi. La tensione di uscita, perciò, si riduce, e quando raggiunge il valore di soglia inferiore il comparatore fa richiudere l'interruttore S ricominciando il ciclo.

Il secondo modello (▸ ***Fig. 15.25b***) descrive un alimentatore a commutazione con tensione di uscita avente la stessa polarità di quella di ingresso, ma di valore superiore (*step-up switching regulator*). In questo tipo di alimentatore a commutazione quando l'interruttore S è chiuso la corrente non circola nel carico, ma solo nell'induttanza L. Aprendo l'interruttore S, attraverso il diodo D viene indotta una corrente che carica il condensatore C. Quando la tensione in uscita ha raggiunto il valore voluto, l'interruttore S viene chiuso e l'induttanza si ricarica, mentre la corrente al carico viene fornita dal condensatore che si scarica; quando la tensione raggiunge un valore di soglia prefissato, l'interruttore S si riapre e il ciclo ricomincia.

Il terzo modello (▸ ***Fig. 15.25c***) descrive un alimentatore a commutazione con tensione di uscita avente polarità invertita rispetto a quella di ingresso (*inverting switching regulator*). L'energia elettromagnetica viene immagazzinata nell'induttanza L quando l'interruttore S viene chiuso; quando S viene aperto, l'energia accumulata viene restituita sotto forma di corrente che aumenta con legge esponenziale. Il condensatore C viene caricato a una tensione negativa attraverso il diodo D. Quando la tensione sul condensatore raggiunge il valore di soglia impostato, l'interruttore viene richiuso. La corrente al carico è fornita dal condensatore, che si scarica. Quando la tensione di uscita raggiunge un valore di riferimento inferiore, l'interruttore viene riaperto e il ciclo si ripete.

Le prestazioni di un alimentatore a commutazione sono strettamente correlate con le proprietà dell'induttanza L. Infatti l'energia accumulata nell'induttanza si conserva nella bobina, esattamente come avviene per il



Figg. 15.25a, b, c
Modelli teorici delle principali configurazioni degli alimentatori a commutazione:
a. step-down switching regulator;
b. step-up switching regulator;
c. inverting switching regulator.

condensatore, in funzione della bontà dell'induttore utilizzato, cioè del grado in cui l'induttore stesso approssima l'induttanza ideale.

La realizzazione pratica di un alimentatore a commutazione richiede che le piste del circuito stampato, o i cavi di connessione se il circuito è realizzato con un cablaggio a fili, siano corti, e che si utilizzi un solo punto di massa. Il condensatore di uscita, che serve per ridurre l'ondulazione residua (ripple) dell'alimentatore a livelli accettabili, dev'essere del tipo al tantalio, che alle alte frequenze ha un comportamento migliore di quello in alluminio.

Il diodo rettificatore e il transistor utilizzato come interruttore devono essere del tipo ad alta velocità di commutazione, e questo per ridurre la dissipazione di potenza durante le commutazioni e incrementare l'efficienza del regolatore.

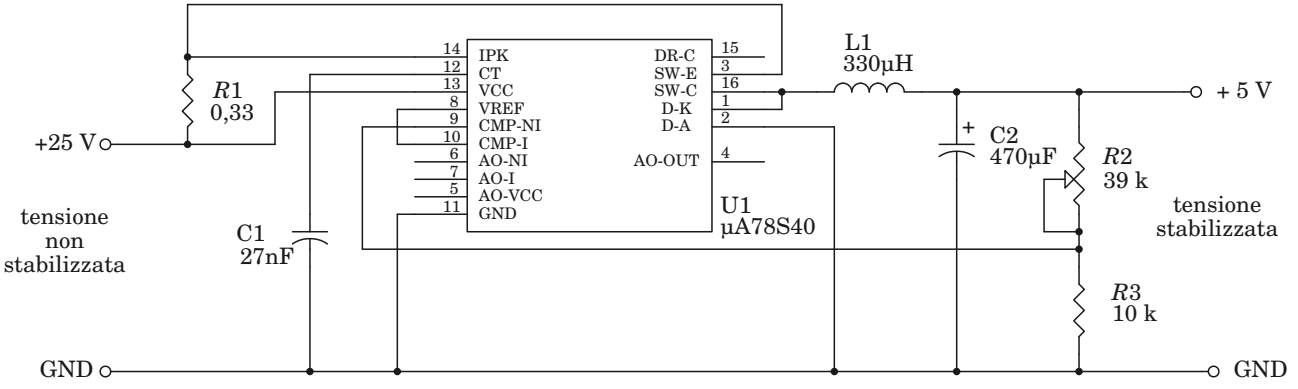
Gli alimentatori a commutazione possono alimentare carichi che richiedono correnti elevate (40 ÷ 50 A) e potenze dell'ordine di un migliaio di watt.

Esistono molti circuiti integrati, progettati da varie case costruttrici, che permettono di produrre in modo semplice ed economico alimentatori a commutazione. Alcuni di essi sono stati costruiti per realizzare solo alcuni tipi di alimentatore, ma altri possono implementare tutti e tre i tipi che abbiamo descritto. Fra i dispositivi commerciali citiamo:

— μA78S40 (Fairchild), che può realizzare tutti e tre i tipi di alimentatori a commutazione;
— MAX 635 (Maxim), che è un inverting switching regulator fisso;
— MAX 638 (Maxim), che è uno switching regulator step-down;
— MAX 641 (Maxim), che è uno switching regulator step-up fisso (V_i = + 1,2 V; V_o = + 5 V);
— MC 3420 (Motorola), che è uno switch-mode regulator control circuit.

Fig. 15.26
Alimentatore a commutazione in configurazione step-down.

La ***figura 15.26*** mostra lo schema di un alimentatore a commutazione realizzato con il microcircuito 78S40 nella configurazione step-down.



La ***figura 15.27*** mostra il circuito interno del regolatore μA78S40. L'alimentatore realizzato è del tipo step-down, cioè produce in uscita una tensione di valore inferiore a quella di ingresso. Il microcircuito ha un oscillatore comandato in corrente, un comparatore, un generatore di tensione di precisione di 1,3 V, un regolatore a transistor (Q1 e Q2) che agisce da interruttore e un amplificatore operazionale ad alto guadagno. Nel circuito proposto l'amplificatore non è utilizzato.

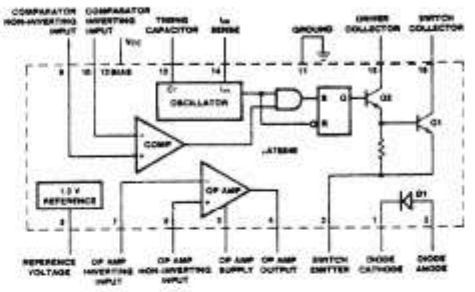
Fig. 15.27
Schema a blocchi interno del microcircuito μA78S40 (*fonte*: Fairchild).

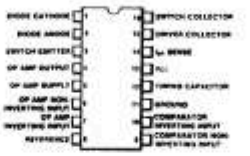
μA78S40

UNIVERSAL SWITCHING REGULATOR SUBSYSTEM

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

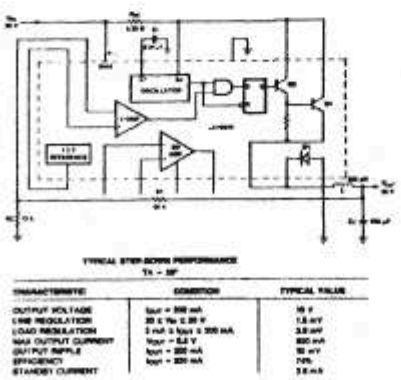
Input voltage from V^+ to V^-	40 V	Current through Power Switch	1.5 A
Input voltage from V^+ op amp to V^-	40 V	Current through Power Diode	1.5 A
Common mode input range (Error Amplifier and Op Amp)	-0.3 to V +	Internal Power Dissipation (Note 2)	
		Plastic DIP	1500 mW
Differential input voltage (Note 1)	±30 V	Hermetic DIP	1000 mW
Output Short Circuit Duration (Op Amp)	continuous	Storage Temperature Range	−65°C to + 150°C
Current from V_{REF}	10 mA	Operating Temperature Range	
Voltage from Switch Collectors to GND	40 V	Military (μA78S40M)	−55°C to 125°C
Voltage from Switch Emitters to GND	40 V	Commercial (μA78S40C)	0°C to 70°C
Voltage from Switch Collectors to Emitter	40 V	Lead Temperature	
Voltage from Power Diode to GND	40 V	Hermetic DIP (Soldering, 60 s)	300°C
Reverse Power Diode Voltage	40 V	Plastic DIP (Soldering, 10 s)	280°C

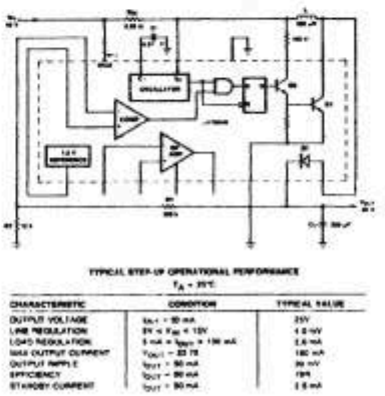


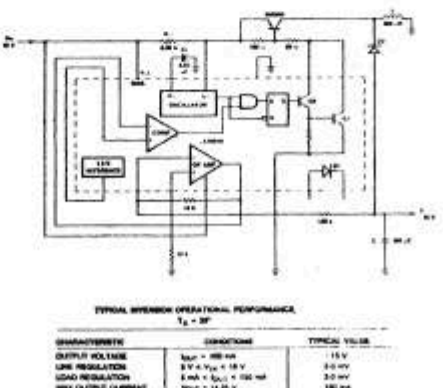


DESIGN FORMULAS

CHARACTERISTIC	STEP DOWN	STEP UP	INVERTING
I_{pk}	$2\ I_{OUT(max)}$	$2\ I_{OUT(max)} \cdot \frac{V_{OUT} + V_D - V_S}{V_{IN} - V_S}$	$2\ I_{OUT(max)} \cdot \frac{V_{IN} + \lvert V_{OUT}\rvert + V_D - V_S}{V_{IN} - V_S}$
R_{SC} *	$0.33\ V/I_{pk}$	$0.33\ V/I_{pk}$	$0.33\ V/I_{pk}$
$\frac{t_{on}}{t_{off}}$	$\frac{V_{OUT} + V_D}{V_{IN} - V_S - V_{OUT}}$	$\frac{V_{OUT} + V_D - V_{IN}}{V_{IN} - V_S}$	$\frac{\lvert V_{OUT}\rvert + V_D}{V_{IN} - V_S}$
L *	$\frac{V_{OUT} + V_D}{I_{pk}} \cdot t_{off}$	$\frac{V_{OUT} + V_D - V_{IN}}{I_{pk}} \cdot t_{off}$	$\frac{\lvert V_{OUT}\rvert + V_D}{I_{pk}} \cdot t_{off}$
t_{off}	$\frac{I_{pk} \cdot L}{V_{OUT} + V_D}$	$\frac{I_{pk} \cdot L}{V_{OUT} + V_D - V_{IN}}$	$\frac{I_{pk} \cdot L}{\lvert V_{OUT}\rvert + V_D}$
C_T * (μF)	$45 \times 10^{-5}\ t_{off(\mu s)}$	$45 \times 10^{-5}\ t_{off(\mu s)}$	$45 \times 10^{-5}\ t_{off(\mu s)}$
C_O *	$\frac{I_{pk} \cdot (I_{pk} + t_{off})}{8\ V_{ripple}}$	$\frac{(I_{pk} - I_{OUT})^2 \cdot t_{off}}{2\ I_{pk} \cdot V_{ripple}}$	$\frac{(I_{pk} - I_{OUT})^2 \cdot t_{off}}{2\ I_{pk} \cdot V_{ripple}}$
Efficiency	$\frac{V_{IN} - V_S + V_D}{V_{IN}} \cdot \frac{V_{OUT}}{V_{OUT} + V_D}$	$\frac{V_{IN} - V_S}{V_{IN}} \cdot \frac{V_{OUT}}{V_{OUT} + V_D - V_S}$	$\frac{V_{IN} - V_S}{V_{IN}} \cdot \frac{\lvert V_{OUT}\rvert}{\lvert V_{OUT}\rvert + V_D}$
$I_{IN(ave)}$ (Max load condition)	$\frac{I_{pk}}{2} \cdot \frac{V_{OUT} + V_D}{V_{IN} - V_S + V_D}$	$\frac{I_{pk}}{2}$	$\frac{I_{pk}}{2} \cdot \frac{\lvert V_{OUT}\rvert + V_D}{V_{IN} + \lvert V_{OUT}\rvert + V_D - V_S}$







L'interruttore è attivato da una memoria Set-Reset comandata dall'oscillatore e dall'uscita del comparatore. Il comparatore paragona nel tempo la tensione generata dal regolatore interno e la frazione della tensione di uscita prelevata per mezzo del partitore *R*2-*R*3. La partizione di tensione è calcolata in modo da generare una tensione pari a quella di riferimento. Quando la tensione di uscita è inferiore al valore di soglia desiderato, il comparatore genera un comando di set che chiude l'interruttore (Q1 e Q2 saturi) quando l'onda generata dall'oscillatore è al livello logico alto, e lo apre (Q1 e Q2 interdetti) quando l'onda è al livello logico basso. Quando la tensione di uscita supera il valore di riferimento, il comparatore disabilita la porta logica e l'interruttore resta sempre aperto, indipendentemente dallo stato dell'onda emessa dall'oscillatore. La corrente di uscita, in questo stato, è data dal condensatore di uscita C2 che, scaricandosi, riduce il valore della tensione di uscita. Quando quest'ultima si riduce al punto da far commutare il comparatore, il ciclo si ripete.

La tensione di uscita è quindi imposta dal partitore di tensione *R*2-*R*3:

$$V_0 = V_{ref} \cdot \frac{R2 + R3}{R3} \qquad 15.7$$

Nel circuito proposto, volendo ottenere in uscita una tensione di + 5 V e ponendo la resistenza *R*3 uguale a 10 kΩ, si ottiene che la resistenza *R*2 deve valere 28,4 kΩ. Poiché questo valore non è previsto nella scala normalizzata, il modo più corretto di calibrare la tensione di uscita è quello di inserire al posto della resistenza fissa una resistenza variabile (*trimmer*). La regolazione della tensione di uscita dell'alimentatore verrà effettuata con un voltmetro.

L'alimentatore a commutazione proposto nella ***figura 15.28*** è del tipo invertente. Il microcircuito MAX 635 è quasi identico al μA78S40 ed è costituito da:

— un comparatore che paragona la tensione di riferimento con una frazione della tensione di uscita ottenuta con un partitore (*R*1-*R*2);
— un transistor interruttore MOS a canale P;
— un oscillatore che genera una frequenza fissa di 50 kHz non controllabile esternamente;
— un generatore di tensione di riferimento di 1,31 V;
— un comparatore che controlla l'alimentatore quando viene utilizzata una batteria con bassa tensione di uscita per generare il segnale di ingresso.

Il principio di funzionamento è quello che abbiamo descritto analizzando il modello teorico.

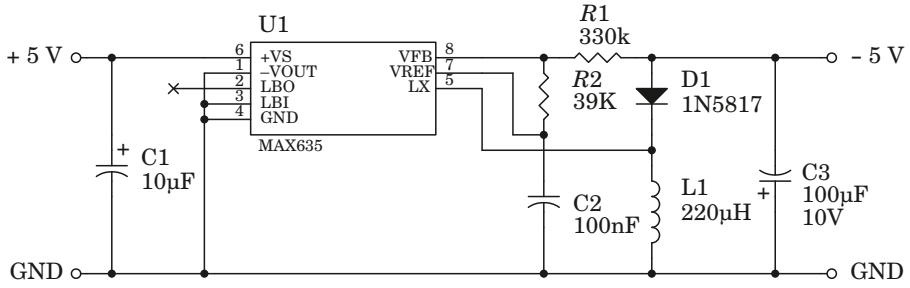


Fig. 15.28
Alimentatore a commutazione in configurazione invertente.

4 CONFRONTO TRA ALIMENTATORI LINEARI E ALIMENTATORI A COMMUTAZIONE

Negli alimentatori lineari il transistor di controllo è posto in serie al carico e viene polarizzato nella zona lineare della sua caratteristica. La regolazione della tensione di uscita è effettuata modulando la conducibilità del transistor in funzione delle variazioni del carico controllato. Il transistor si comporta, cioè, come una resistenza variabile. La dissipazione di potenza richiesta è notevole e aumenta proporzionalmente all'aumentare del carico.

Il transistor di controllo nell'alimentatore a commutazione (l'interruttore S nei modelli teorici) opera invece passando dallo stato di interdizione a quello di saturazione, ciò significa che o conduce pienamente o non conduce affatto. La dissipazione di potenza risulta quindi alquanto limitata. Ciò permette di utilizzare trasformatori di potenza inferiore e ingombro ridotto, e di impiegare dissipatori di potenza più piccoli per il transistor di controllo.

Una misura del maggior rendimento di un regolatore a commutazione rispetto a un modello convenzionale è data dal rapporto fra potenza ottenuta in uscita e potenza fornita in ingresso, cioè dall'efficienza. Questo parametro, in genere espresso come valore percentuale, è di circa il 50% per gli alimentatori lineari ed è pari, o maggiore, al 75 ÷ 90% per quelli a commutazione.

Gli alimentatori a commutazione presentano un'ondulazione residua (ripple) in uscita molto maggiore rispetto a quelli convenzionali (centinaia di mV). Inoltre, l'elevata velocità di commutazione genera disturbi in radiofrequenza che devono essere soppressi con apposite griglie di schermatura. Questi regolatori vengono utilizzati in apparecchiature in cui il peso e le dimensioni ridotte (strumenti portatili) e l'efficienza dell'alimentatore (alimentazione a batteria) sono di fondamentale importanza.

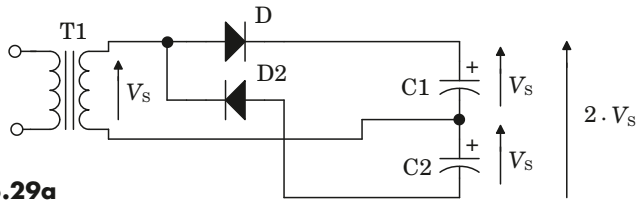
5 CONVERTITORI DI CORRENTE CONTINUA (DC/DC)

In molte applicazioni elettroniche di bassa potenza sono richieste tensioni in corrente continua di valore superiore a quello disponibile sulla scheda che si sta utilizzando (convertitore non invertente), oppure tensioni in corrente continua con polarità opposta (convertitore invertente); poiché non sempre è conveniente costruire un alimentatore apposito, si preferisce utilizzare opportune configurazioni circuitali che sono in grado di elevare e/o invertire la tensione applicata in ingresso.

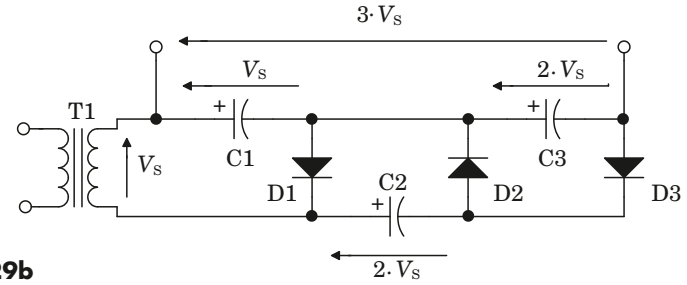
Le ***figure 15.29a, b, c*** mostrano dei semplici circuiti che moltiplicano la tensione in uscita partendo dalla tensione di rete.

Un convertitore di corrente continua (*DC converter*) viene di solito ottenuto con un generatore di onde quadre seguito da una rete duplicatrice. Quello della ***figura 15.30*** è stato realizzato con un temporizzatore 555 in configurazione astabile per generare l'onda quadra, e un duplicatore di tensione per elevare la tensione; in corrispondenza di un aumento di tensione si ha una conseguente diminuzione della corrente di uscita erogabile.

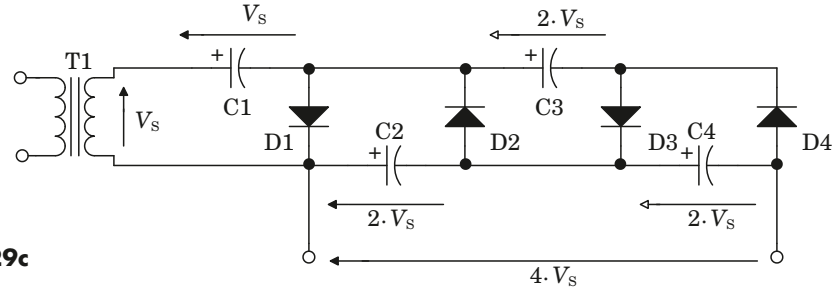
Figg. 15.29a, b, c
Principali configurazioni dei moltiplicatori della tensione di rete:
a. duplicatore di tensione;
b. triplicatore di tensione;
c. quadruplicatore di tensione.



15.29a



15.29b



15.29c

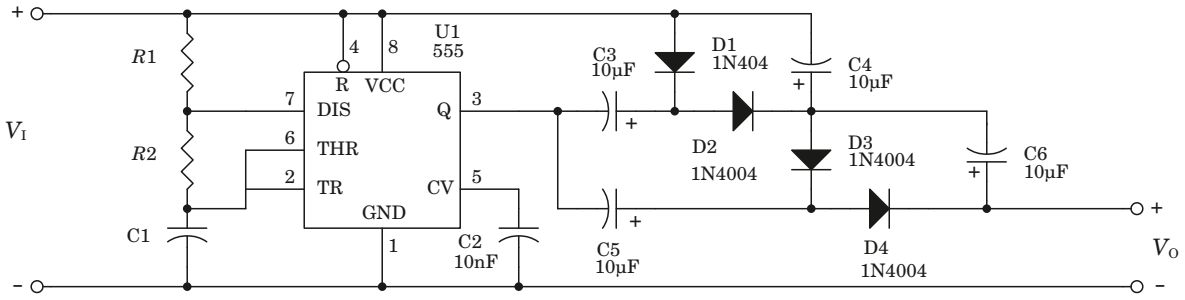


Fig. 15.30
Duplicatore di tensione ottenuto mediante un multivibratore astabile.

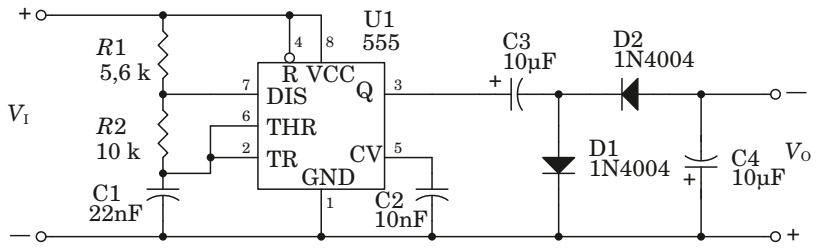
Una conversione in corrente continua con cambio di polarità può essere ottenuta con le configurazioni circuitali delle ***figure 15.31a, b***.

Convertitori monolitici

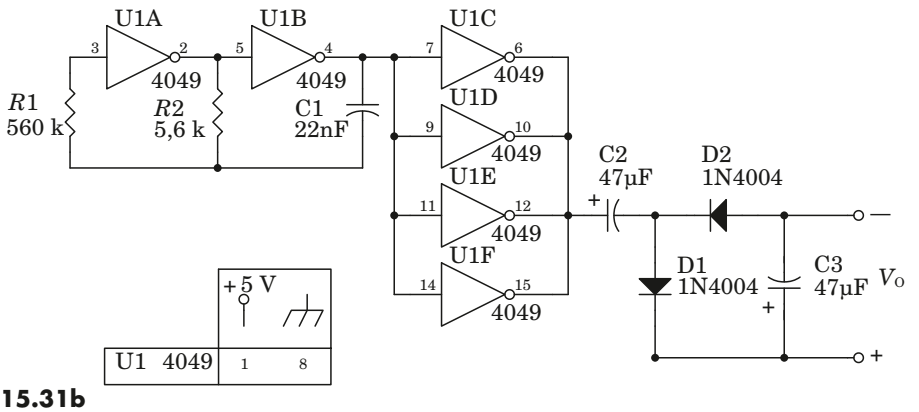
Questi convertitori costruiti con la tecnologia dei circuiti integrati ibridi hanno sostituito, soprattutto nelle applicazioni professionali, gli alimentatori prodotti con le tecniche tradizionali. Sono stati sviluppati essenzialmente per esigenze legate ai sistemi di acquisizione dei dati che, trattando segnali analogici, richiedono tensioni duali di valore elevato (± 12 V_{dc}; ± 15 V_{dc}).

Se il sistema analogico viene inserito in un'apparecchiatura nuova è possibile scegliere anche un sistema di alimentazione tradizionale, ma se il sistema analogico dev'essere aggiunto a un'apparecchiatura già realizzata occorre apportare al suo circuito di alimentazione modifiche che non sempre sono economicamente giustificate.

Figg. 15.31a, b
Convertitore di corrente continua con polarità invertita:
a. impiegando un multivibratore astabile realizzato con un temporizzatore *555*;
b. con porte CMOS.



15.31a



15.31b

I convertitori monolitici permettono di ricavare da sorgenti di alimentazione a tensione singola, tipiche dei sistemi digitali, tensioni di alimentazione duali maggiori o minori della tensione di ingresso, senza comportare modifiche dell'apparecchiatura originaria. Le dimensioni di questi moduli sono molto contenute, per cui possono trovare un'agevole collocazione su una scheda formato Eurocard (100 × 160 mm).

I convertitori DC/DC trasformano una tensione continua positiva applicata in ingresso in una o più tensioni di uscita; in uscita si può avere un solo valore di tensione, una tensione duale o una tensione sia positiva sia duale. Per esempio, un convertitore di corrente continua con una tensione di ingresso di + 5 V_{dc} può presentare in uscita una tensione di + 12 V_{dc} (**uscita singola**) oppure ± 12 V_{dc} (**uscita duale**). Il circuito è protetto dalle sovratensioni in ingresso e dai cortocircuiti in uscita. Le caratteristiche di isolamento sono ottime relativamente sia alla tensione di isolamento (> 1000 V di picco) sia alla resistenza (> 10 GΩ) sia alla capacità (> 25 pF) di isolamento.

Negli schemi il convertitore DC/DC viene rappresentato con un rettangolo. Gli ingressi sono disegnati da un lato, in genere a sinistra, e l'uscita (o le uscite) dall'altro. Tutte le connessioni devono essere chiaramente identificate e numerate (▸ ***Fig. 15.32***).

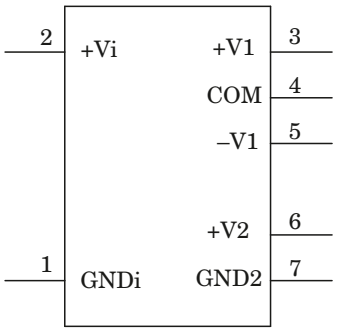


Fig. 15.32
Identificazione di un convertitore di corrente continua.

Qualche costruttore realizza questi circuiti con componenti SMD, cioè adatti per il montaggio superficiale, che permettono una migliore dissipazione di potenza per cui è possibile costruire moduli in grado di operare entro campi di variazione della temperatura abbastanza ampi (da – 40 a + 100 °C).

Il **contenitore** di un convertitore DC/DC ha la forma di un parallelepipedo. La posizione dei terminali è fornita in genere mostrando la posizione relativa dei fori su una griglia quadrettata con passo in decimi di

pollice. Il contenitore è realizzato con materiali plastici non conduttivi e schermato in modo tale da effettuare un'efficace filtraggio del rumore sia in ingresso sia in uscita.

La **frequenza di switching** è molto elevata per mantenere basso il livello delle interferenze ambientali di tipo elettromagnetico (EMI) e di radiofrequenza (RFI). I terminali possono essere per circuito stampato o con morsetti a vite.

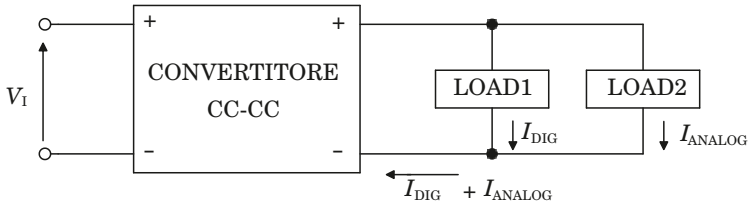
RFI
– Radio frequency interference

Le ***figure 15.33a, b*** mostrano come vanno connessi più carichi posti in parallelo al convertitore: il tecnico che realizza il circuito di connessione, per esempio il circuito stampato, deve fare in modo che ogni circuito collegato al convertitore abbia percorsi indipendenti dagli altri carichi. Queste precauzioni evitano la formazione di anelli di terra suscettibili di generare spiacevoli effetti dovuti alle interazioni fra i carichi in parallelo.

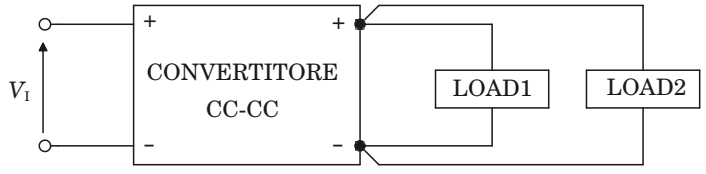
Nella ***figura 15.33a***, se il carico LOAD1 è un circuito digitale e LOAD2 un carico di potenza, il circuito digitale funziona correttamente solo se il carico di potenza non viene collegato. Se invece si effettua questo collegamento, sul filo di ritorno fra convertitore e carico LOAD1 la corrente, somma delle correnti che circolano in LOAD1 e in LOAD2, provoca una caduta di tensione che va a modificare il riferimento di tensione del circuito logico (▸ ***Fig. 15.33b***). Quest'ultimo potrebbe quindi avere dei malfunzionamenti che cesserebbero con la disconnessione del carico LOAD2.

Questi convertitori sono utilizzati nei controlli di processo, nei sistemi biomedici, nei circuiti elettronici per avionica, nelle telecomunicazioni e in generale in tutte le applicazioni che richiedono la conversione della tensione di alimentazione.

Figg. 15.33a, b
Metodi di connessione dei convertitori di corrente continua:
a. con linee di ritorno in comune;
b. con linee di ritorno distinte.



15.33a



15.33b

PER FISSARE I CONCETTI

1. Che cos'è un regolatore a commutazione? Descrivine il funzionamento.
2. Quali sono i tipi di funzionamento di un alimentatore a commutazione? Descrivine uno a scelta.
3. Quali sono i principali vantaggi offerti da un alimentatore a commutazione rispetto a uno a regolazione serie?
4. Quali sono i campi applicativi di un convertitore di corrente continua?

APPLICAZIONI

ALIMENTATORE A COMPONENTI DISCRETI

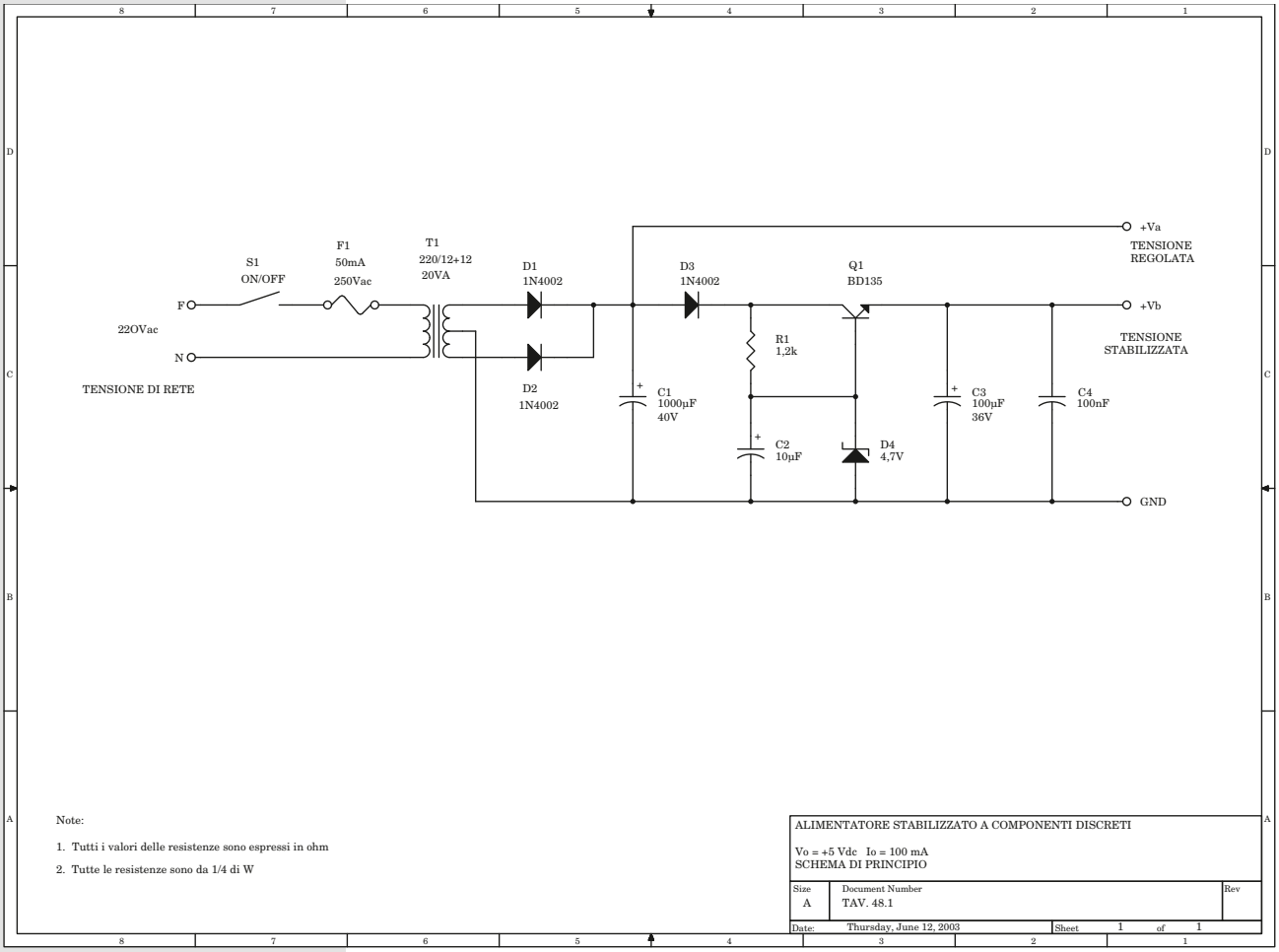
Il circuito proposto nella ***tavola 15.1*** rappresenta un alimentatore con regolazione serie nel quale il transistor regolatore Q1 funziona anche da nodo di confronto fra tensione di uscita e tensione di riferimento.

L'alimentatore fornisce in uscita due tensioni:

— V_b, una tensione continua stabilizzata dal circuito regolatore;

— V_a, una tensione continua ma non stabilizzata.

TAVOLA 15.1
Alimentatore stabilizzato a componenti discreti: schema di principio.



Una soluzione circuitale di questo tipo è utilizzata per alimentare circuiti che richiedono valori di corrente elevata, ma non una tensione stabilizzata. Per esempio, un circuito logico che comanda un relè richiede che l'alimentazione del micrologico sia stabilizzata, ma non è necessario che lo sia anche quella del relè, per cui il circuito logico utilizza la tensione stabilizzata V_b, mentre il relè viene alimentato con la tensione V_a. Questo accorgimento costruttivo rende il progetto dell'apparecchiatura più semplice ed economico.

Le caratteristiche elettriche dell'alimentatore sono presentate nella ***tabella 15.1***, insieme alla lista dei componenti. Il dimensionamento del cir-

cuito è stato effettuato con le formule di progetto presentate nelle figure 15.10 e 15.14, pp. 270 e 272.

Tabella 15.1 Alimentatore stabilizzato a componenti discreti

CARATTERISTICHE ELETTRICHE

Tensione di ingresso:	220 V_{ac}
Tensione di uscita:	+ 5 V_{dc}
Corrente massima di uscita:	100 mA

LISTA DEI COMPONENTI DELLA SCHEDA A CIRCUITO STAMPATO

N.	Sigla	Descrizione			
1	C1	condensatore	1000 µF	40 V	elettrolitico
1	C2	condensatore	100 µF	36 V	elettrolitico
1	C3	condensatore	10 µF	36 V	elettrolitico
1	C4	condensatore	100 nF	100 V	poliestere
4	D1 ÷ D3	diodo al silicio	1N4002		
1	D4	diodo Zener	BZX83C4V7 (1N750A JEDEC) 500 mW		
2	J1, J2	connettore	a 3 poli a inserzione maschio		
1	Q1	transistor BJT	BD135		
1	R1	resistenza	1,2 KΩ	1/4 W	5% a strato

LISTA DEI COMPONENTI DELL'APPARECCHIATURA

1	F1	fusibile	250 V_{ac} / 50 mA	
1	S1	interruttore	1 via 1 posizione; a levetta	
1	T1	trasformatore	220 V/12 + 12 V	20 VA
1		portafusibile	da pannello	

La potenza massima dissipata P_{Dmax} dal transistor BJT di regolazione è data da:

$$P_{D\max} = (V_s \cdot \sqrt{2} - 3 \times V_D - V_o) \cdot I_{o(\max)} = \quad (15.8)$$
$$= (12 \times 1,41 - 3 \times 0,7 - 5) \times 0,1 \cong 1 \text{ W}$$

dove:

V_s è la tensione efficace sul secondario
V_D è la caduta di tensione diretta su ciascuno dei diodi del ponte e D3
V_o è la tensione di uscita
$I_{o(max)}$ è la corrente massima erogata al carico

Per verificare se il transistor è in grado di dissipare il calore prodotto è necessario ricavare dal foglio tecnico del componente i valori della resistenza termica giunzione-ambiente R_{thja} del contenitore TO-220 del dispositivo (70 °C/W) e la resistenza termica giunzione-contenitore R_{thjc} (4,2 °C/W):

$$T_j = P_{D(\max)} \cdot R_{thja} + T_a = 1 \cdot 70 + 40 = 110\ °C \quad (15.9)$$

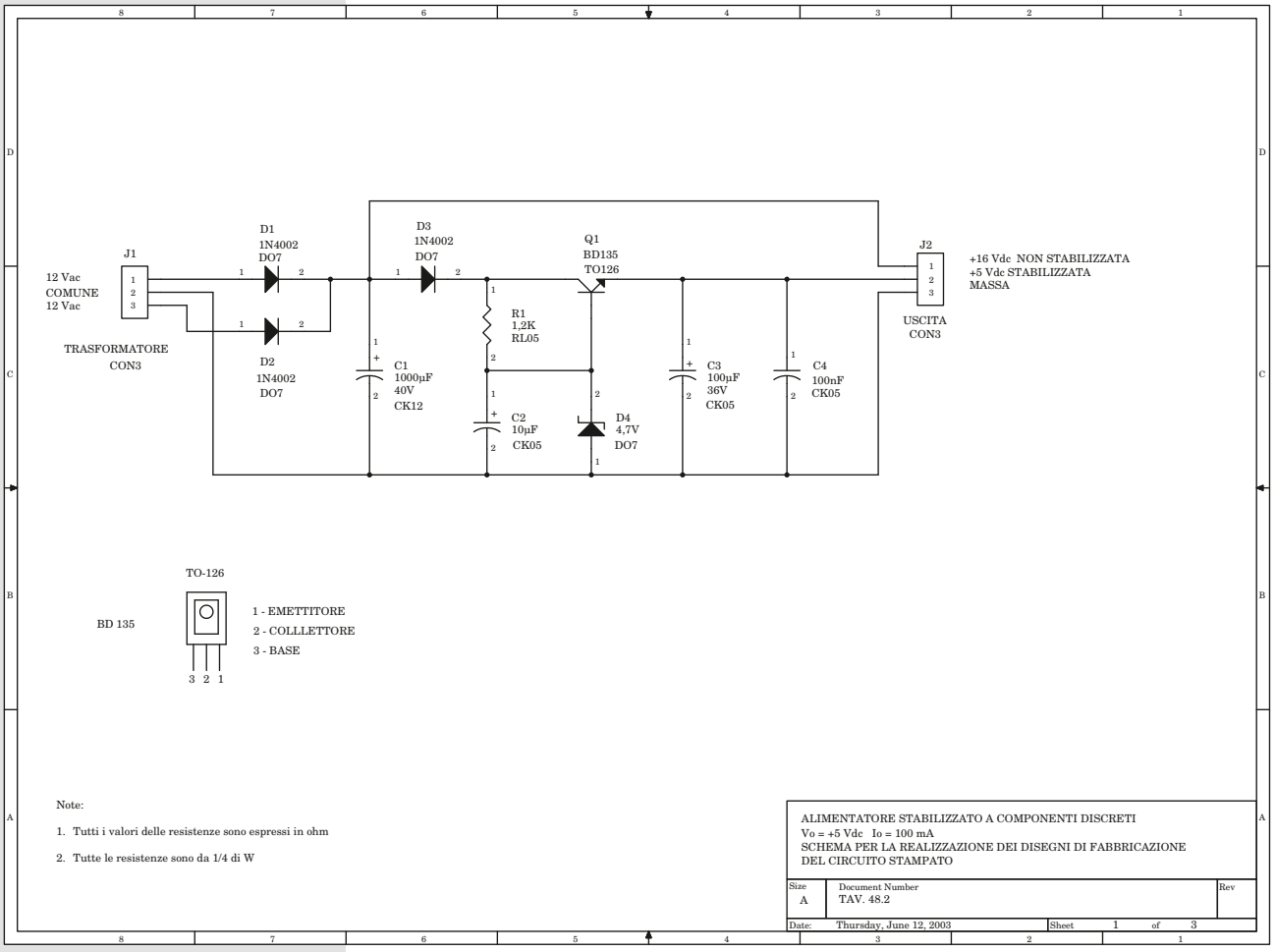
La giunzione raggiunge quindi una temperatura inferiore a quella massima (150 °C), per cui il dispositivo può dissipare il calore senza l'aggiunta di alcun dissipatore.

Quello presentato nella tavola 15.1 è uno schema di principio; non può essere utilizzato per realizzare i disegni di fabbricazione del circuito stampato perché alcuni componenti che vi compaiono non sono montati sul circuito stampato (essi saranno fissati al contenitore dell'apparecchiatura e cablati con il circuito stampato mediante cavi di connessione nel modo indicato nello schema di principio). Lo schema deve quindi essere depurato dei componenti che non vengono montati sulla scheda, sostituendoli, se necessario, con gli elementi effettivamente presenti: nel nostro esempio, l'interruttore, il fusibile e il trasformatore di rete vanno eliminati e sostituiti con un connettore, e in uscita va inserito un connettore a due poli.

La ***tavola 15.2*** mostra il disegno del circuito opportunamente modificato. Il progetto del circuito stampato richiede, una volta disegnato lo schema elettrico, l'estrazione della lista dei collegamenti (*netlist*); per rendere compatibile la descrizione dei componenti della libreria SDT con quelle dei moduli dei contenitori del CAD per il PCB occorre sostituire la libreria device.lib con la pcbdev.lib. Le nuove versioni delle librerie contengono le informazioni relative al simbolo e al contenitore in modo integrato in un'unica libreria.

L'avvenuta sostituzione si evidenzia sullo schema con la comparsa, accanto a ogni simbolo, del numero di riferimento di ciascun terminale; la presenza di tale informazione permette di controllare la lista dei collega-

TAVOLA 15.2
Alimentatore stabilizzato a componenti discreti: schema per la realizzazione dei disegni di fabbricazione del circuito stampato.



menti e, durante lo sbroglio del circuito stampato, facilita, quando sono richieste, le operazioni di sostituzione fra dispositivi equivalenti (cambio di porte) o fra moduli differenti (un contenitore TO-220 con un TO-3). Per facilitare, inoltre, l'analisi e il controllo della lista dei collegamenti, nell'elenco delle informazioni di ogni componente compare anche il nome di identificazione del modulo del contenitore a esso associato; si è quindi caratterizzato il campo 8 con la caratteristica di visibilità (comando Edit/8th Address Line/Visible/Yes) e con un'adeguata operazione di posizionamento della scritta (comando Edit/8th Address Line/ Location).

Il piazzamento e lo sbroglio del circuito è stato eseguito utilizzando solo in parte la funzione di sbroglio automatico: molte piste devono essere sconnesse e ricollegate manualmente per adattare la loro larghezza al valore delle correnti che le percorrono, e per scegliere percorsi più semplici e corretti rispetto a quelli proposti dallo sbrogliatore.

La documentazione per la realizzazione del circuito stampato si compone dei seguenti disegni:

— disegno che illustra la posizione dei vari componenti sulla scheda (◗ ***Tav. 15.3***);
— disegno del master del lato componenti (◗ Tav. 15.3);
— disegno del master del lato saldature (◗ Tav. 15.3);
— disegno del piano di foratura (◗ ***Tav. 15.4***);
— disegno della maschera per il solder resist (◗ Tav. 15.4);
— disegno per la maschera serigrafica da imprimere sulla scheda (◗ Tav. 15.3).

Il circuito proposto nella ***tavola 15.5*** è, dal punto di vista funzionale, identico al precedente. La corrente di uscita controllata è più elevata in quanto l'elemento regolatore è formato da due transistor (Q1 e Q2) connessi in configurazione Darlington.

TAVOLA 15.3
Alimentatore stabilizzato a componenti discreti: layout e master.

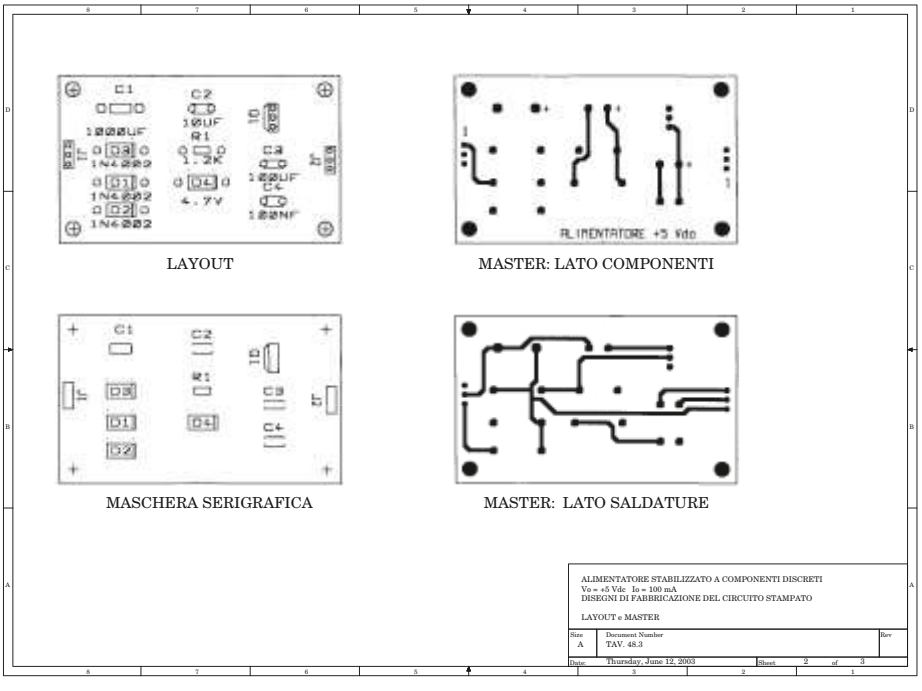


TAVOLA 15.4

Alimentatore stabilizzato a componenti discreti: piano di foratura e solder mask.

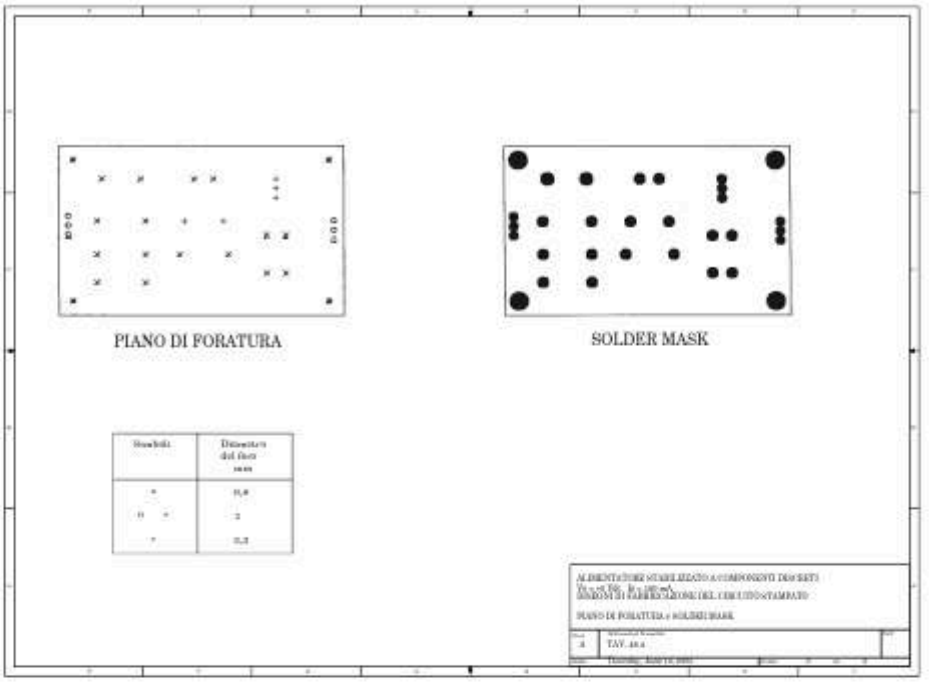
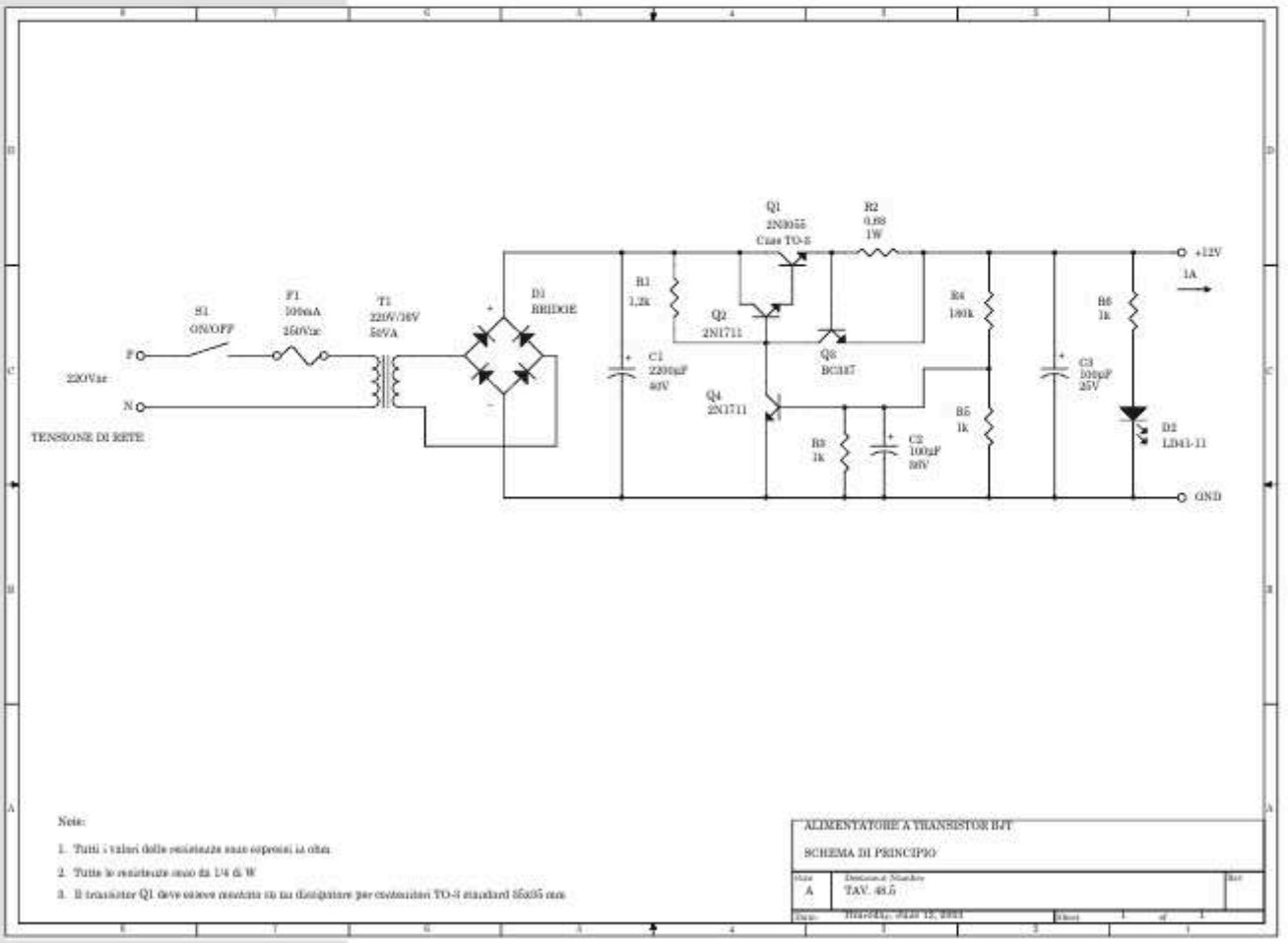


TAVOLA 15.5

Alimentatore stabilizzato a transistor BJT: schema di principio.



Il transistor Q4 effettua il confronto tra una frazione della tensione di uscita prelevata tramite il partitore di tensione $R4$-$R5$ e la tensione di riferimento, che in questo caso coincide con la massa (0 V_{cc}). Il circuito è provvisto di un limitatore di corrente formato dal transistor Q3 e dalla resistenza campionatrice $R2$. La resistenza $R2$, di basso valore, essendo connessa in serie al circuito regolatore permette di misurare la corrente fornita dall'alimentatore al carico. Il suo valore viene calcolato in modo tale che, quando la corrente di uscita supera il valore massimo consentito, il transistor Q3 entra in conduzione limitando quella dei transistor regolatori. Il led D5 segnala che la tensione di uscita è presente.

Le caratteristiche elettriche dell'alimentatore sono riassunte nella ***tabella 15.2***; la ***figura 15.34*** mostra la lista dei componenti. Il dimensionamento del circuito è stato effettuato con le formule di progetto presentate nelle figure 15.10 e 15.14, pp. 270 e 272.

La potenza massima dissipata (P_{Dmax}) dal transistor BJT di regolazione è data da:

$$P_{D\max} = (V_s \cdot \sqrt{2} - 3 \cdot V_D - V_O) \cdot I_{o(max)} =$$
$$= (16 \times 1,41 - 2 \times 0,7 - 12) \times 1 = 9,16 \text{ W} \qquad \textbf{15.10}$$

Tabella 15.2 Alimentatore stabilizzato a transistor BJT

CARATTERISTICHE ELETTRICHE

Tensione di ingresso:	220 V_{ac}
Tensione di uscita:	+ 12 V_{dc}
Corrente massima di uscita:	1 A

LISTA DEI COMPONENTI DELLA SCHEDA A CIRCUITO STAMPATO

N.	Sigla	Descrizione			
1	C1	condensatore	2200 µF	40 V	elettrolitico
1	C2	condensatore	100 µF	36 V	elettrolitico
1	C3	condensatore	100 µF	25 V	elettrolitico
1	D1	ponte di diodi	al silicio	50 V/2A	
1	D2	diodo led	LD41-11	o equiv. rosso diam. 5 mm	
2	J1, J2	connettore		a 2 poli a vite I_{max} > 1,5A	
1	Q1	transistor BJT	2N3055	case TO-3	
2	Q2, Q4	transistor BJT	2N1711	case TO-5	
1	Q3	transistor BJT	BC337	case TO-92	
1	R1	resistenza	1,2 KΩ	1/4 W	5% a strato
1	R2	resistenza	0,68 Ω	1W	10% a strato
3	R3, R5, R6	resistenza	1 KΩ	1/4 W	5% a strato
1	R4	resistenza	180 KΩ	1/4 W	5% a strato
2		dissipatore	per case TO-3		

LISTA DEI COMPONENTI DELL'APPARECCHIATURA

1	F1	fusibile	250 V_{ac} / 100 mA	
1	S1	interruttore	1 via 1 posizione; a levetta	
1	T1	trasformatore	220 V/16 V	50 VA
1		portafusibile	da pannello	

Fig. 15.34
Dimensionamento del dissipatore di calore per il transistor regolatore serie dell'alimentatore a componenti discreti.

Potenza dissipata	Pd	**9,16**	W
Temperatura ambiente	Ta	**40**	°C
Resistenza termica giunzione-ambiente	Rthja	**32**	°C/W
Resistenza termica giunzione-contenitore	Rthjc	**2,1**	°C/W
Resistenza termica contenitore-ambiente	Rthca	29,9	°C/W
Temperatura giunzione massima	Tjmax	**150**	°C
Verifica: Rthjc < Rthja(max) < Rthja			
Resistenza termica giunzione-ambiente	Rthja (max)	12,01	°C/W
Resistenza termica contenitore-dissipatore	Rthcd	**0,25**	°C/W
Coefficiente A= Rthja(max)-Rthjc	A	9,91	°C/W
Caratteristica del dissipatore di potenza			
Resistenza termica dissipatore-ambiente massima	**Rthda(max)**	**14,57**	**°C/W**
Scelta del dissipatore di potenza			
Resistenza termica dissipatore-ambiente massima	Rthda	**6,00**	°C/W
Verifica della temperatura della giunzione			
Temperatura della giunzione	Tj	106,59	°C

Poiché la resistenza termica giunzione-ambiente (R_{thja}) del contenitore TO-3 usato dal dispositivo è di 32 °C/W, e la resistenza termica giunzione-contenitore (R_{thjc}) è di 2,5 °C/W, si ha:

$$T_j = P_{Dmax} \cdot R_{thja} + T_a = 9{,}16 \times 32 + 40 = 333\ °C$$

Questa temperatura, notevolmente superiore a quella massima sopportabile dalla giunzione, impone l'adozione di un **dissipatore di calore**. Per il dimensionamento occorre rifarsi alle indicazioni di progetto (◗ ***Vol. 1, Mod. C, Cap. 8***, scaricabile dal sito Internet) oppure, se si è già padroni dell'argomento, ricorrere al programma applicativo del foglio elettronico (◗ ***Vol. 1, Mod. D, Cap. 10***, scaricabile dal sito Internet).

Nel foglio elettronico vengono inseriti, nelle celle evidenziate dal riquadro, i dati di progetto (potenza massima dissipata, temperatura ambiente, resistenza termica, giunzione ambiente e giunzione contenitore); il programma restituisce il valore massimo della resistenza termica del dissipatore. A questo punto si ricerca sui fogli tecnici dei dissipatori quello che presenta un valore di resistenza termica dissipatore-ambiente minore e un rapporto prestazione-ingombro-costo migliore; si inserisce il dato nell'apposita casella e si valuta il valore raggiunto dalla temperatura di giunzione: se è soddisfacente, cioè minore del valore massimo (T_{jmax}) consentito, il dimensionamento è terminato.

Nel nostro caso si è prescelto un dissipatore commerciale molto diffuso che possiede una resistenza termica dissipatore-ambiente di 6 °C/W, (◗ ***Fig. 15.35***). Il testo dell'elaborazione viene presentato nella ***tabella 15.3***.

Come per l'esempio precedente, anche in questo caso lo schema presentato nella tavola 15.1 è di principio e va modificato per realizzare i disegni di fabbricazione del circuito stampato, eliminando i componenti che non devono esservi montati.

Fig. 15.35
Dissipatore di calore commerciale per contenitori tipo TO-3.

Tabella 15.3 Alimentatore con regolatore di tensione a tre terminali

CARATTERISTICHE ELETTRICHE

Tensione di ingresso:	220 V_{ac}
Tensione di uscita:	+ 5 V_{dc}
Corrente massima di uscita:	500 mA

LISTA DEI COMPONENTI DELLA SCHEDA A CIRCUITO STAMPATO

N.	Sigla	Descrizione			
1	C1	condensatore	4700 µF	25 V	elettrolitico
1	C2	condensatore	220 µF	16 V	elettrolitico
1	C3	condensatore	100 nF	400 V	poliestere
4	D1 ÷ D4	diodo al silicio	1N4002		
1	J1	connettore	a 2 poli a inserzione maschio		
1	J2	connettore	a 2 poli a vite		
1	U1	IC LIN	µA 7805	voltage regulator case TO-220	
1		dissipatore	per TO-220		

LISTA DEI COMPONENTI DELL'APPARECCHIATURA

1	F1	fusibile	250 V_{ac}/30 mA	
1	S1	interruttore	2 vie 1 posizione; a levetta	
1	T1	trasformatore	220 V/12 V	15 VA
1		portafusibile	da pannello	

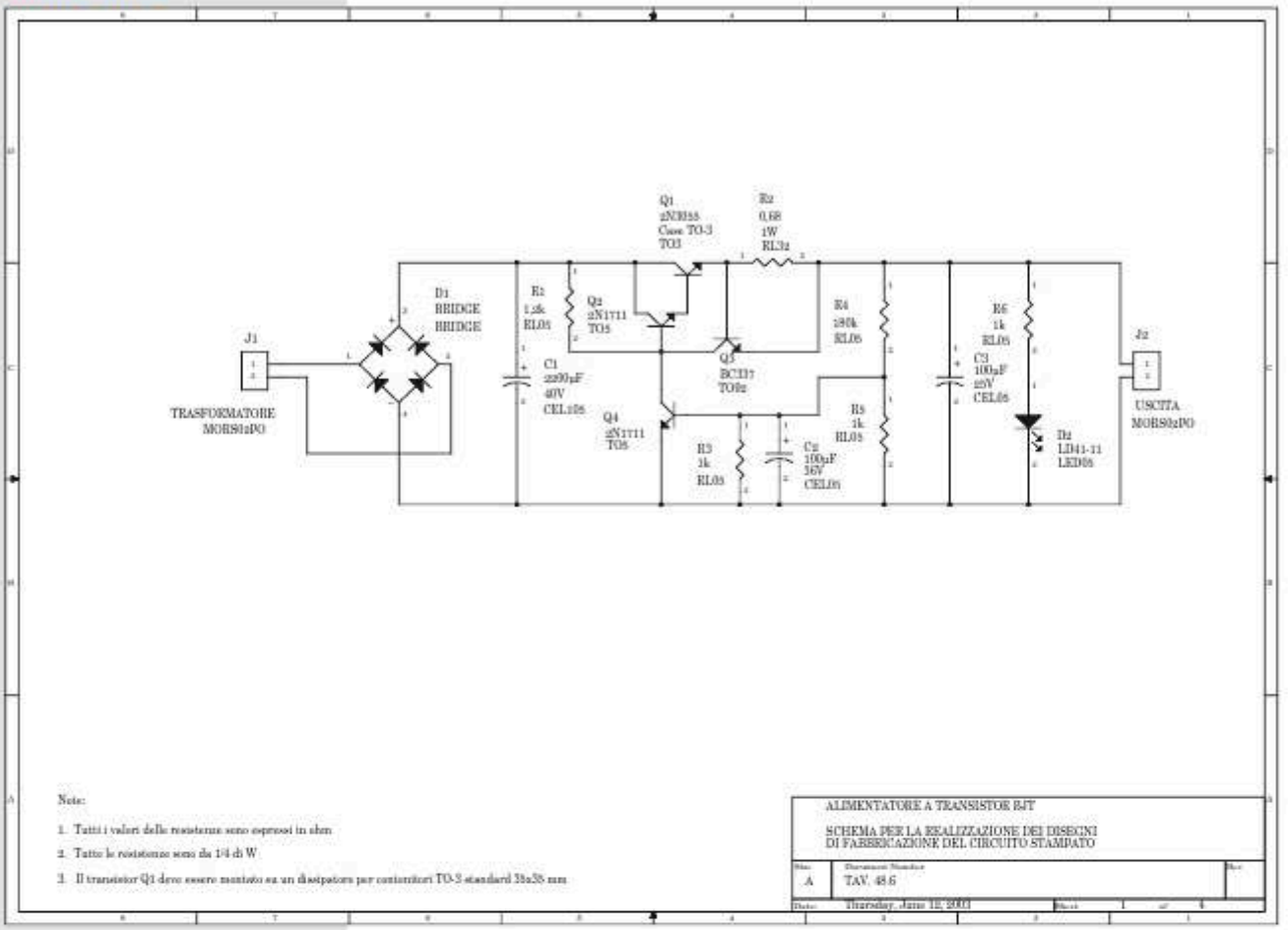
Il disegno del circuito, modificato con l'aggiunta di due connettori e con l'eliminazione di tutta la parte del circuito a monte del raddrizzatore a ponte, è mostrato nella ***tavola 15.6***.
Il contenitore del transistor di potenza TO-3 e quello del ponte a diodi non sono compresi tra quelli standard del programma, per cui devono essere disegnati prima di caricare la netlist utilizzando l'editor dei moduli del programma OrCAD/PCB (comando Library) o quello del CAD che si sta utilizzando (OrCAD Capture, Eagle, CIRCAD o altri). L'unico componente che richiede una particolare attenzione nel posizionamento è il contenitore TO-3 del transistor di potenza che, come viene ricordato nella nota a margine sul disegno, necessita di un dissipatore di potenza.

La documentazione per la realizzazione del circuito stampato è così composta:

— disegno illustrante la posizione dei diversi componenti sulla scheda (◗ ***Tav. 15.7***);
— disegno del master del lato componenti (◗ ***Tav. 15.8***);
— disegno del master del lato saldature (◗ Tav. 15.8);
— disegno del piano di foratura (◗ ***Tav. 15.9***);
— disegno della maschera per il solder resist ((◗ Tav. 15.9);
— disegno per la maschera serigrafica da imprimere sulla scheda (◗ Tav. 15.7).

TAVOLA 15.8

Alimentatore stabilizzato a transistor BJT: schema elettrico.



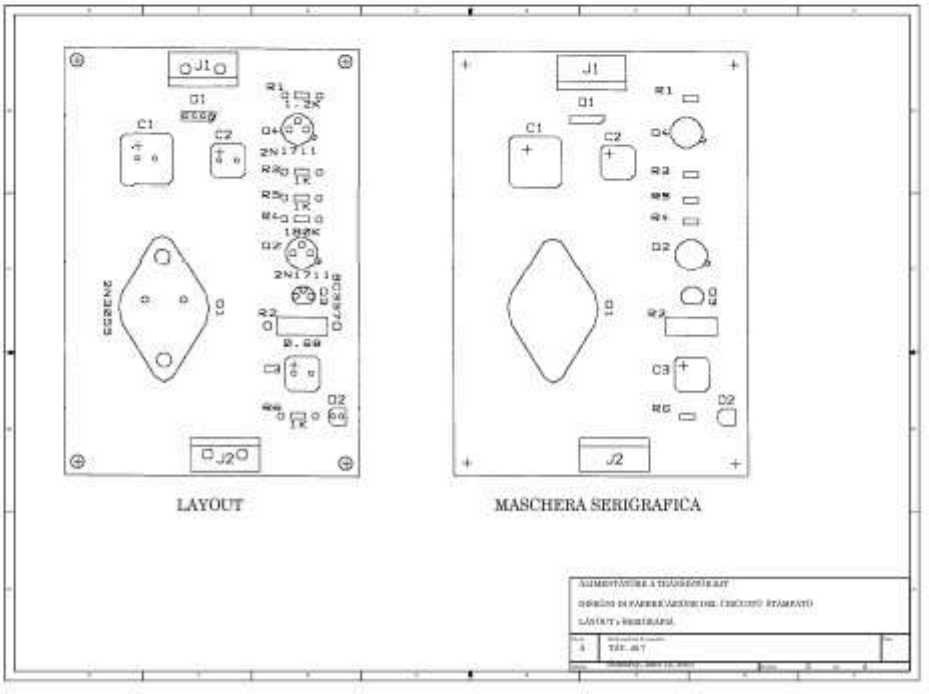


TAVOLA 15.7

Alimentatore stabilizzato a transistor BJT: layout e serigrafia.

TAVOLA 15.8

Alimentatore stabilizzato a transistor BJT: lato componenti e lato saldature.

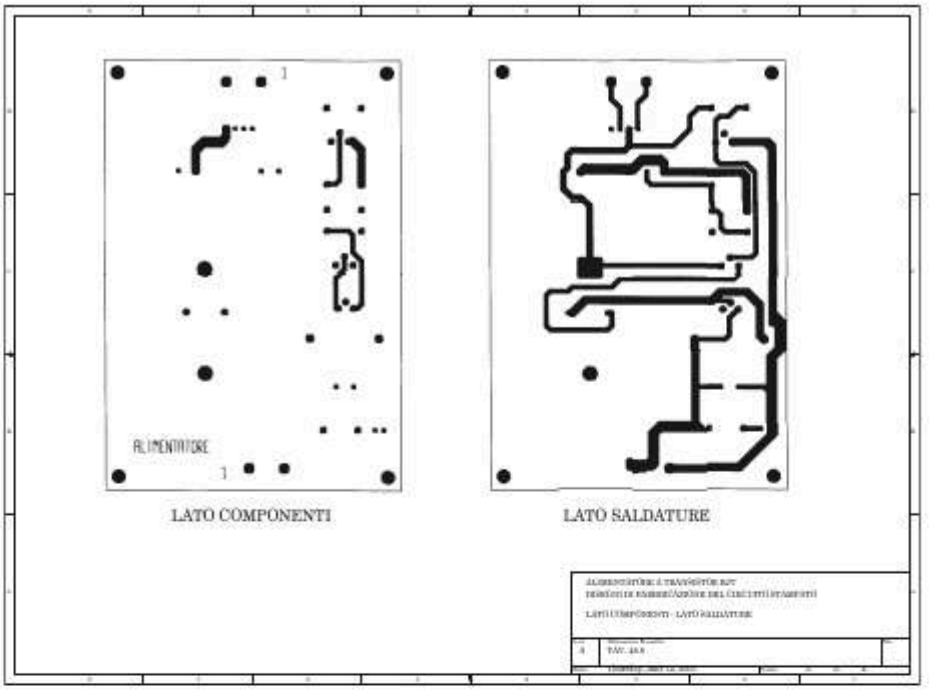
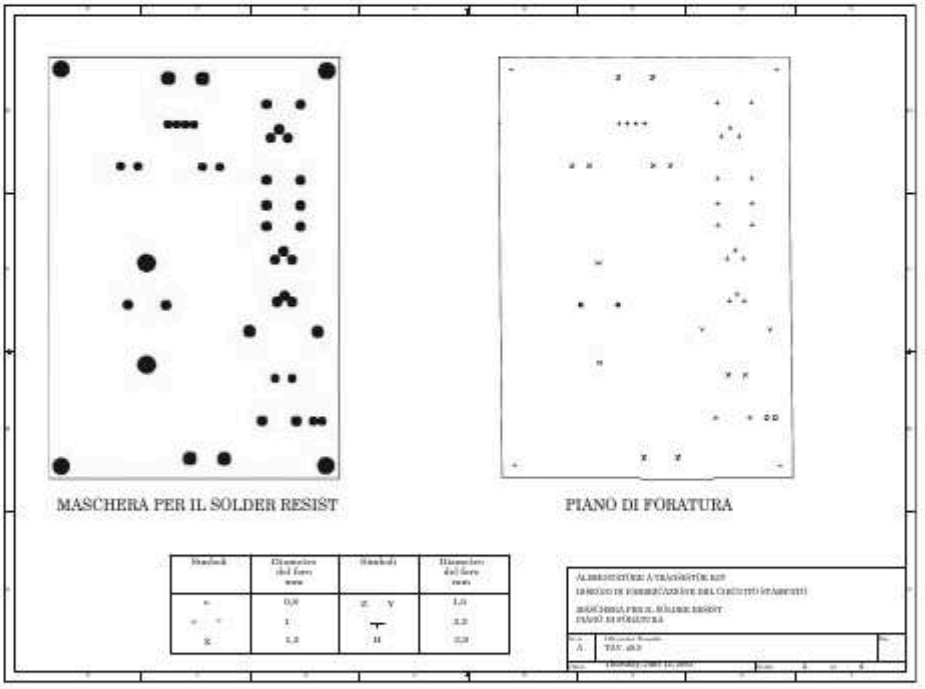


TAVOLA 15.9

Alimentatore stabilizzato a transistor BJT: maschera per il solder resist e piano di foratura.



ESERCIZIO

Ricerca, utilizzando la documentazione tecnica disponibile in laboratorio, i dati tecnici e le dimensioni di tutti i componenti l'apparecchiatura assenti nella scheda: interruttore, fusibile, portafusibile, trasformatore, passacavo, una boccola rossa e una boccola nera. Scegli un contenitore di dimensioni e forma adatte e disegna lo schema di cablaggio completo di tutta l'apparecchiatura.

A.2

ALIMENTATORE CON REGOLATORE A TRE TERMINALI

Il circuito mostrato nella ***tavola 15.10*** utilizza un microcircuito monolitico per generare una tensione di uscita costante positiva.

Le caratteristiche elettriche dell'alimentatore sono presentate nella tabella 15.3 insieme alla lista dei componenti. Codificando le caratteristiche del trasformatore, lo stesso circuito può essere utilizzato anche con regolatori che hanno valori di tensione e di corrente di uscita differenti. Per la tensione di ingresso deve valere la seguente disuguaglianza:

$$V_{IN(max)} > V_{IN} > V_{0(max)} + \Delta V_L + V_{R(pk)} \qquad \textbf{15.11}$$

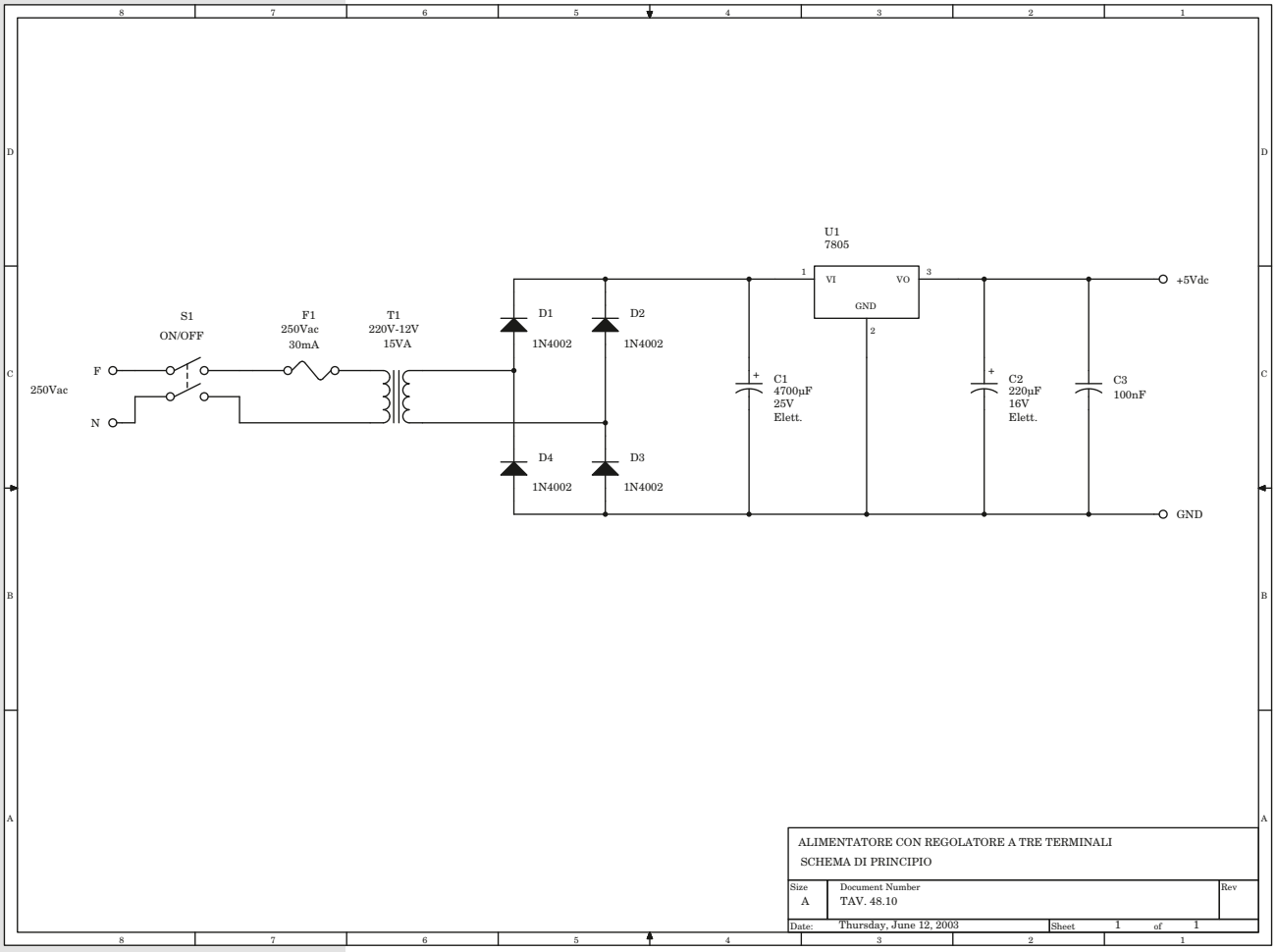
dove:

$V_{IN(max)}$ è la tensione di ingresso massima del dispositivo (si legge sul data sheet del regolatore)

V_{IN} è la tensione di ingresso del regolatore sotto carico

$V_{0\,(max)}$ è la massima tensione di dropout (si legge sul data sheet del regolatore, per il 7805 vale 2 V con una corrente di uscita di 1 A)

TAVOLA 15.10
Alimentatore stabilizzato con regolatore a tre terminali: schema di principio.

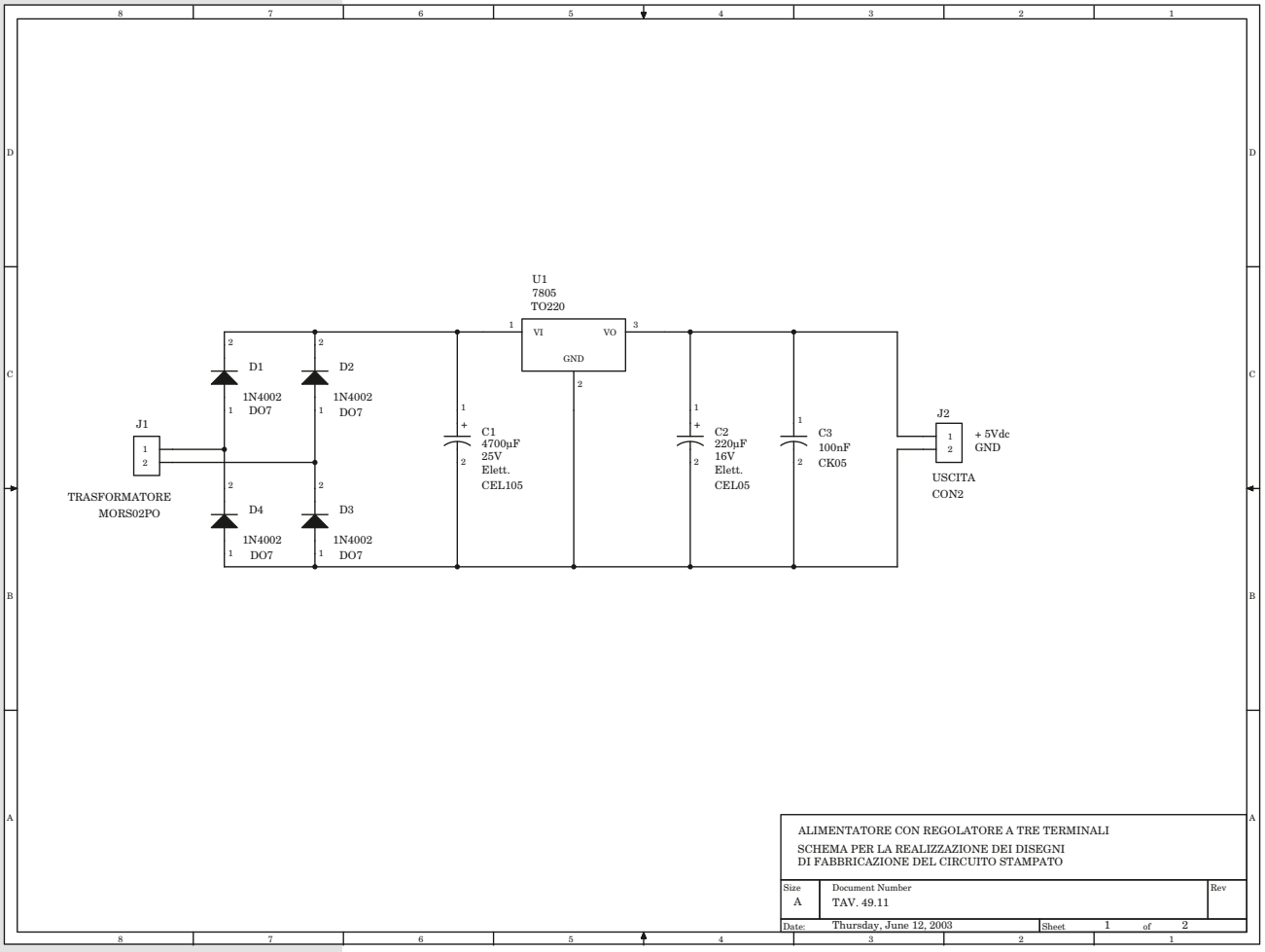


ΔV_L è la massima variazione della tensione di rete (l'ente di distribuzione garantisce la tensione di rete con una variazione del 10% del valore nominale)

$V_{R(pk)}$ è la tensione di ripple picco-picco (data dalle specifiche di progetto)

Quello presentato nella tavola 15.10 è uno schema di principio e dev'essere modificato per poter realizzare i disegni di fabbricazione del circuito stampato, eliminando i componenti che non devono esservi montati. Il disegno del circuito, modificato con l'aggiunta di due connettori e con l'eliminazione di tutta la parte di circuito che si trova a monte del raddrizzatore a ponte, è mostrato nella ***tavola 15.11***.

TAVOLA 15.11
Alimentatore stabilizzato con regolatore a tre terminali: schema elettrico.



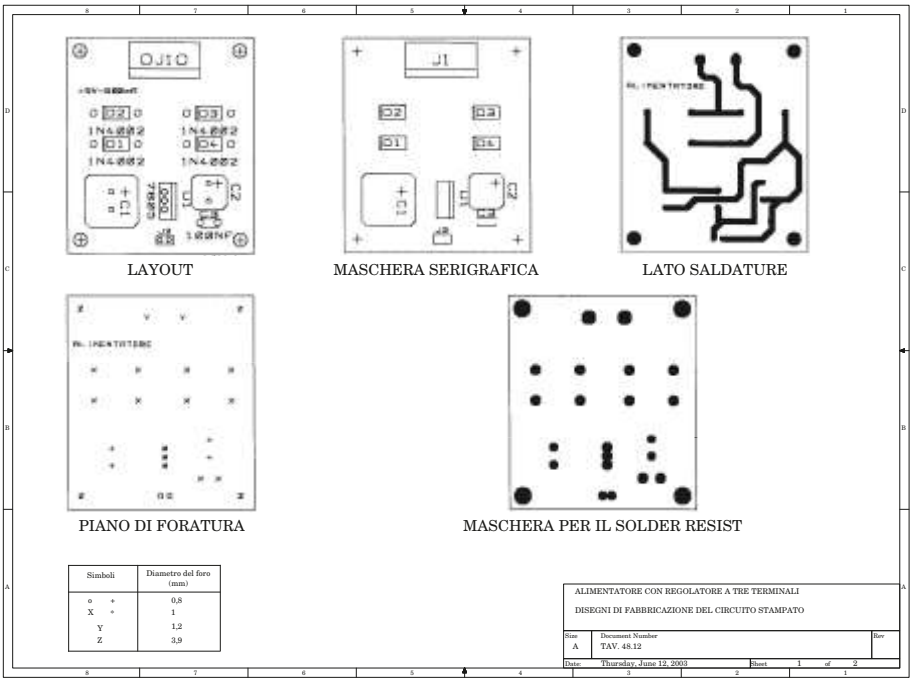
Lo sbroglio di questo circuito è stato effettuato in modo da realizzare tutte le connessioni su un solo lato della piastra (circuito stampato monofaccia): si possono così ridurre i costi di produzione perché diminuisce il numero delle lavorazioni da effettuare.

Questa soluzione è adottata in genere per circuiti stampati a uso civile che vengono prodotti in grandi quantità.

La documentazione riguardante la realizzazione del circuito stampato è così composta (▸ ***Tav. 15.12***):

— disegno che illustra la posizione dei diversi componenti sulla scheda;
— disegno del master del lato saldature;
— disegno del piano di foratura;
— disegno della maschera per il solder resist;
— disegno per la maschera serigrafica da imprimere sulla scheda.

TAVOLA 15.12
Alimentatore stabilizzato con regolatore a tre terminali: disegni di fabbricazione del circuito stampato.



ESERCIZI

2.1 Effettua i calcoli termici e verifica che la temperatura della giunzione non superi, durante il funzionamento, il valore massimo consentito.

2.2 Dopo avere messo a punto il circuito con una qualsiasi tecnica di realizzazione, ricava il diagramma tensione-corrente di uscita e misura l'ondulazione (ripple).

2.3 Riprogetta il circuito per una corrente di uscita di 1,2 A sostituendo i componenti che non soddisfano la nuova specifica.

2.4 Se si sostituisce il regolatore 7805 con un 7812, il circuito funziona ancora oppure è necessario modificare qualche componente? Se sì, quali e in che modo?

2.5 Progetta un alimentatore in grado di erogare una tensione di – 15 V con una corrente di uscita massima di 500 mA.

2.6 Utilizzando lo schema della tavola 15.11 riprogetta il circuito stampato modificando la disposizione dei componenti.

SINTESI DEL MODULO H

CAPITOLO 15

Gli alimentatori sono particolari assemblaggi di componenti elettronici che convertono l'energia ricevuta dalla rete di alimentazione in corrente alternata nella forma richiesta dall'apparato elettronico da alimentare.

— Un tipico **alimentatore corrente alternata-corrente continua** è formato dai seguenti elementi funzionali: il trasformatore di rete, il circuito raddrizzatore, il filtro di livellamento, il regolatore o stabilizzatore di tensione. Il **trasformatore di rete** provvede di norma ad abbassare il valore della tensione di ingresso. Un **circuito raddrizzatore** rende unidirezionale la corrente in un carico generando una tensione di uscita pulsante.

— Il segnale generato all'uscita del raddrizzatore a ponte ha un andamento pulsante. Negli alimentatori tale ondulazione viene espressa dal **fattore di ondulazione residua** (fattore di ripple). Questo fenomeno negli alimentatori stabilizzati è indesiderato e dev'essere ridotto il più possibile mediante l'uso di un **filtro di livellamento** che accumula energia quando la corrente aumenta, e quando la corrente diminuisce restituisce l'energia accumulata fornendo corrente al carico in uscita.

— Il **regolatore di tensione** assorbe le variazioni di tensione dovute alle variazioni delle condizioni di carico (**regolazione di carico**), alle fluttuazioni della tensione di ingresso (**regolazione di linea**) e alle variazioni della temperatura. La regolazione della tensione di uscita si può ottenere con due schemi di collegamento, uno serie e uno parallelo. Quando l'elemento di regolazione è **connesso in parallelo** all'uscita, effettua la regolazione assorbendo più o meno corrente; viene realizzato con un diodo Zener. Gli alimentatori di tipo parallelo presentano l'inconveniente di poter controllare solo escursioni del carico limitate.

— Con l'elemento di regolazione è **connesso in serie**, il circuito di stabilizzazione misura il valore della tensione di uscita, lo confronta con una tensione di riferimento costante e utilizza il segnale di errore per modificare le caratteristiche di conduzione, e quindi la caduta di tensione ai capi dell'elemento di regolazione, per annullare la differenza fra tensione di uscita e di riferimento. Questo tipo di stabilizzazione richiede che la tensione di ingresso sia sempre maggiore di quella di uscita.

Gli **alimentatori a commutazione** funzionano in base al seguente principio: un generatore di impulsi provoca periodicamente la chiusura e l'apertura di un interruttore e consente di trasferire l'energia elettrica dal filtro di ingresso al filtro di uscita che la immagazzina. L'energia immagazzinata viene poi erogata al carico in uscita. La quantità di energia trasferita dipende dalla durata e dalla frequenza degli impulsi applicati sull'interruttore.

— Gli alimentatori a commutazione possono generare sia tensioni inferiori a quella di ingresso (**regolatori a riduzione**) sia tensioni superiori (**regolatori a incremento**). La tensione di uscita può essere positiva o negativa.

Negli **alimentatori lineari**, la regolazione della tensione di uscita è effettuata modulando la conducibilità del transistor in funzione delle variazioni del carico controllato. La dissipazione di potenza richiesta è notevole e aumenta proporzionalmente all'aumentare del carico.

Nell'**alimentatore a commutazione** (l'interruttore S nei modelli teorici), il transistor di controllo opera, invece, passando dallo stato di interdizione a quello di saturazione; ciò significa che conduce pienamente oppure non conduce affatto. La dissipazione di potenza risulta quindi alquanto limitata. Tutto ciò permette di utilizzare trasformatori di potenza inferiore e di ingombro ridotto, e di impiegare dissipatori di potenza più piccoli per il transistor di controllo.

In molte applicazioni elettroniche di bassa potenza sono richieste tensioni in corrente continua di valore superiore a quello disponibile sulla scheda che si sta utilizzando (**convertitore non invertente**) oppure tensioni in corrente continua con polarità opposta (**convertitore invertente**). Poiché non sempre è conveniente costruire un alimentatore apposito, si preferisce utilizzare opportune configurazioni circuitali realizzate in forma integrata con la **tecnologia dei circuiti ibridi**.

— I convertitori costruiti con la tecnologia dei circuiti integrati ibridi hanno sostituito, soprattutto nelle applicazioni professionali, gli alimentatori prodotti con le tecniche tradizionali. Sono stati sviluppati essenzialmente per i sistemi di acquisizione dati che, trattando segnali analogici, richiedono tensioni duali di valore elevato.

VERIFICHE

1.
Qual è la funzione del fusibile in un alimentatore? Perché viene inserito sulla linea di fase? Disegna il simbolo grafico completo dei riferimenti significativi.

2.
Disegna un raddrizzatore a ponte di Graetz e descrivine il funzionamento.

3.
Come si dimensiona il valore della tensione sul secondario del trasformatore in un alimentatore stabilizzato?

4.
Disegna lo schema a blocchi di un tipico alimentatore AC/DC e descrivi la funzione svolta da ciascun blocco funzionale.

5.
Qual è la funzione del blocco limitatore di corrente in un regolatore di tipo serie? Descrivi la soluzione detta “a corrente costante”.

6.
Che cosa accade all’alimentatore se la tensione di ingresso diminuisce fino a causare una caduta della tensione di dropout al di sotto del suo valore minimo? Come si evita questo problema?

7.
Disegna e descrivi lo schema elettrico interno del regolatore multiterminale 723.

8.
Per ottenere correnti di uscita elevate è possibile connettere due o più transistor in parallelo. Descrivi le problematiche relative a questo tipo di connessione.

9.
Che cos’è un regolatore a commutazione? Quali vantaggi offre rispetto a uno a regolazione serie?

10.
Quali sono i campi applicativi di un convertitore DC/DC?

MODULO I

Conversione analogico-digitale e digitale-analogico

CAP 16

CONVERTITORI

Prerequisiti

- Principali dispositivi semiconduttori discreti.
- Principali caratteristiche dei dispositivi micrologici a MSI di tipo combinatorio (codificatori, decodificatori, multiplexer e demultiplexer, addizionatori, comparatori).
- Principali caratteristiche dei dispositivi micrologici a MSI di tipo sequenziale (memorie, contatori, registri a scorrimento).

Obiettivi

Conoscenze

- Principi di funzionamento del processo di conversione A/D e D/A.
- Principi di funzionamento dei processo di conversione VFC.
- Principali parametri caratteristici dei processi di conversione.

Competenze

- Saper progettare e realizzare un sistema di conversione A/D e D/A.
- Saper risolvere i principali problemi che la conversione A/D e D/A pone nella realizzazione di un circuito stampato e di un'apparecchiatura elettronica.
- Saper utilizzare i convertitori nei sistemi di acquisizione dei dati e di misura.

CAP 16

Concetti chiave

- Campionamento
- Potere risolutivo
- Precisione
- Quantizzazione
- Risoluzione
- Sensibilità
- Tempo di conversione

CONVERTITORI

1 Convertitori D/A
2 Convertitori A/D
3 Convertitori tensione/frequenza e frequenza/tensione
Applicazione 1: Strumento di misura digitale
Applicazione 2: Convertitore digitale-analogico unipolare

RISORSE ONLINE

Applicazione 3: Convertitore A/D ad approssimazioni successive unipolare
Applicazione 4: Pannello indicatore a tre cifre e mezzo
Applicazione 5: Sistema di acquisizione dati a un canale
Applicazione 6: Indicatore digitale

I circuiti descritti nel capitolo precedente (▸ ***Mod. H, Cap. 15***) elaborano segnali di tipo analogico, cioè grandezze che possono assumere, nel tempo, un insieme continuo di valori, mentre i circuiti digitali (▸ ***Vol. 1, Mod. F, Cap 15***) elaborano grandezze che assumono valori binari, cioè associabili a due soli valori. I circuiti che analizzeremo in questo capitolo permettono di convertire i segnali di tipo analogico in segnali di tipo digitale (convertitori analogico-digitale o A/D) e i segnali di tipo digitale in segnali di tipo analogico (convertitori digitale-analogico o D/A).

Generalmente i trasduttori forniscono in uscita segnali elettrici di tipo analogico (▸ ***Mod. A, Cap. 1***), per cui i processi di conversione sono necessari in quasi tutte le applicazioni elettroniche. La conversione di una grandezza analogica in una digitale viene compiuta attraverso una quantizzazione del segnale analogico. L'intervallo di variazione del segnale di ingresso viene suddiviso in più parti e a ogni porzione viene assegnato un diverso valore binario (**quantizzazione**). Effettuando poi una serie di letture a intervalli di tempo costanti (**campionamento**) si trasforma l'informazione in ingresso in una serie di impulsi di ampiezza variabile. Il segnale che si ottiene è quindi analogico in ampiezza e discreto nel tempo.

Attraverso l'operazione di quantizzazione è possibile attribuire a ogni impulso un corrispondente valore binario. Affinché la conversione sia precisa occorre che il valore di quantizzazione sia il più piccolo possibile; questo valore dipende essenzialmente dal numero di bit utilizzati per descriverlo. Se si utilizzano due variabili si ottengono quattro valori distinti, con tre variabili otto valori ecc.

I convertitori commerciali realizzati con le tecnologie dei circuiti integrati sono a 8, 10, 12, 16 bit.

In un convertitore a 8 bit si ha un intervallo di quantizzazione

$$\frac{E}{2^n} = \frac{E}{8} \qquad 16.1$$

mentre per E = 10 V l'intervallo di quantizzazione è di 39 mV. Il convertitore genera quindi in uscita lo stesso numero binario per una variazione del segnale di ingresso di 39 mV. Se il convertitore è a 10 bit, l'intervallo di quantizzazione si riduce a 3,7 mV; con 12 bit diventa di 2,4 mV.

La **risoluzione** del convertitore dipende dal numero di bit utilizzati per la conversione: quanti più bit si utilizzano tanto maggiore è il **potere risolutivo** del convertitore. Il potere risolutivo del convertitore definisce la minima variazione del segnale di ingresso che è in grado di generare in uscita una variazione di codice.

Il numero di letture o, più precisamente, il numero di campionamenti effettuati nel tempo sul segnale di ingresso, determina la precisione della conversione effettuata: quanto maggiore è il numero delle letture effettuate, tanto più alta è la precisione con cui si possono misurare eventuali variazioni del segnale di ingresso. La frequenza di campionamento deve comunque essere, in accordo con il teorema del campionamento, maggiore del doppio della frequenza massima contenuta nel segnale di ingresso da convertire.

1 CONVERTITORI D/A

DAC
– Digital-analogic converter

I convertitori digitali-analogici (D/A o **DAC**) convertono l'informazione binaria (in forma parallela o seriale), applicata in ingresso, in una grandezza di tipo analogico (corrente, tensione). Il segnale analogico in uscita è proporzionale al valore numerico della parola binaria applicata in ingresso.

Un convertitore D/A è formato dalle seguenti unità funzionali:

— un generatore di tensione o corrente di riferimento (*reference voltage*);
— una rete resistiva (*ladder*);
— un convertitore corrente-tensione.

La tensione di riferimento ottenuta dal generatore di tensione ha un'influenza diretta sul valore della tensione di uscita, e quindi dev'essere molto precisa e stabile. In alcuni micrologici la tensione di riferimento va generata con un regolatore esterno; in altri casi, invece, il regolatore è interno al microcircuito stesso e la regolazione della tensione può essere fatta con una resistenza variabile esterna.

Se si utilizza un regolatore esterno è opportuno usare i microcircuiti (*voltage regulator*) sviluppati dalle case costruttrici appositamente per essere impiegati con i convertitori D/A (o analogici-digitali: A/D). Questi dispositivi generano tensioni di uscita costanti con bassissimi valori di ondulazione e possiedono circuiti interni che riducono l'effetto di deriva delle caratteristiche elettriche dovuto alle variazioni di temperatura.

Il convertitore corrente-tensione trasforma i livelli di corrente generati dalla rete resistiva in un segnale di tensione. Questo elemento, in genere, non è presente nel microcircuito perché il segnale di uscita tipico dei microcircuiti D/A è una corrente, e quindi l'eventuale conversione corrente-tensione, se necessaria, viene fatta esternamente.

L'equazione fondamentale di un convertitore D/A è:

$$V_u = V_{ref}\left(\frac{b_n}{2} + \frac{b_{n-1}}{2^2} + \ldots + \frac{b_1}{2^n}\right) \qquad 16.2$$

dove:

V_u è la tensione di uscita
V_{ref} è la tensione di riferimento
$b_n \ldots b_1$ è la parola binaria di ingresso (*word*)

Come si può dedurre dall'equazione (16.1), la tensione di uscita del convertitore non ha un valore continuo. Infatti al variare del codice binario applicato in ingresso si ha, nella rete resistiva, una variazione di corrente discreta.

Il **gradiente di tensione** misurabile in uscita è perciò pari a

$$\frac{V_{ref}}{2^n} \qquad (16.3)$$

La risoluzione della conversione del numero digitale dipende dal numero di bit che compongono la parola binaria di ingresso; dall'equazione (16.3) si deduce infatti che il gradiente di tensione in uscita si riduce in modo proporzionale all'aumento del numero di cifre binarie utilizzate in ingresso. La **precisione della conversione** in questi convertitori dipende essenzialmente dalla precisione e dalla stabilità del valore delle resistenze che compongono la rete resistiva.

I convertitori D/A possono essere di tipo unipolare o bipolare. Il **D/A unipolare** genera in uscita una tensione positiva; il **D/A bipolare** genera in uscita una tensione duale, positiva e negativa.

I convertitori D/A vengono classificati in funzione della configurazione circuitale della rete resistiva (*ladder*) utilizzata per convertire il segnale digitale.

Le configurazioni più comuni sono:
— rete resistiva a resistenze pesate;
— rete resistiva del tipo R-$2R$.

Convertitore D/A a resistenze ponderate

La ***figura 16.1*** mostra un modello semplificato del convertitore a resistenze ponderate (*weighted resistors converter*).

Il valore delle resistenze inserite nella rete dipende dal numero di bit che compongono la parola binaria di ingresso. La resistenza di valore più elevato vale $2^n\ b_1$.

Se si aumenta il numero di cifre binarie da convertire, le resistenze della rete assumono valori molto elevati. Queste resistenze sono difficilmente realizzabili con la precisione necessaria, per cui il convertitore non può essere usato per convertire parole binarie con molte cifre.

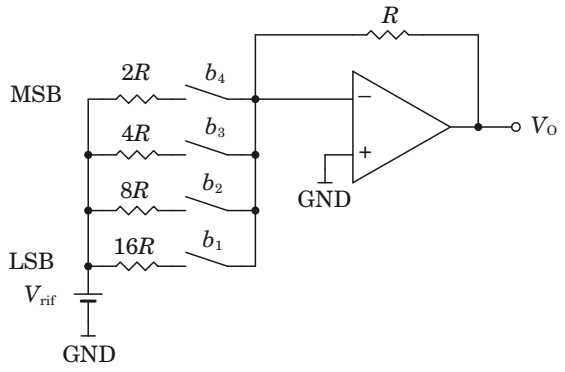


Fig. 16.1
Convertitore D/A a resistenze ponderate.

Convertitore D/A con rete resistiva tipo R-$2R$

In questi convertitori D/A la rete resistiva viene realizzata usando solo due valori resistivi: R e $2R$.

Le resistenze sono connesse secondo una configurazione circuitale che mantiene valida l'equazione fondamentale dei convertitori come mostrato nella ***figura 16.2***.

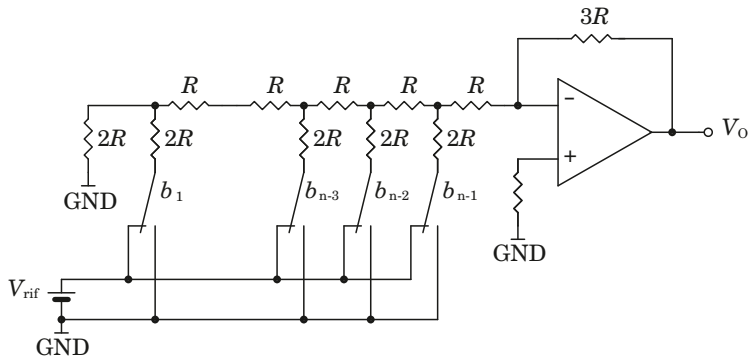


Fig. 16.2
Convertitore D/A a rete di resistenze *R-2R*.

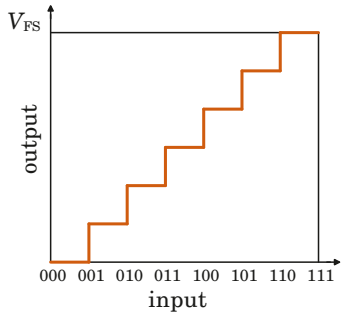


Fig. 16.3
Curva di trasferimento ingresso-uscita di un convertitore D/A.

Caratteristiche dei convertitori D/A

Il segnale del convertitore si presenta come una successione di gradini di tensione (▸ ***Fig. 16.3***).

L'ampiezza del gradino di tensione è data dall'equazione (16.2); il gradino, come abbiamo già detto, esprime il **potere risolutivo** del convertitore e rappresenta la più piccola variazione di tensione ottenibile in uscita. Nei fogli tecnici è espresso in valore percentuale o in parti per milione:

$$\text{potere risolutivo} = \frac{V_{ref}}{2^n} \times 100 \qquad \textbf{16.4}$$

$$\text{potere risolutivo} = \frac{V_{ref}}{2^n} \times 10^6 \,\text{ppm} \qquad \textbf{16.5}$$

Un D/A che converte una parola binaria di 8 bit genera 256 gradini di tensione con un potere risolutivo dello 0,39% o di 3906 ppm.

Il valore di fondo scala del convertitore è dato dalla massima ampiezza che il segnale di uscita può assumere mantenendo un comportamento lineare quando tutti i bit del segnale di ingresso sono al livello logico alto. La precisione del convertitore è data dalla differenza tra il valore teorico che dovrebbe assumere in corrispondenza di un certo codice applicato in ingresso e il valore reale ottenuto. I valori forniti dai fogli tecnici si riferiscono, in genere, al valore di fondo scala.

Altri parametri che in qualche applicazione assumono una certa importanza sono il **tempo di stabilizzazione della tensione in uscita** (*settling time*), definito dall'intervallo di tempo che intercorre fra una variazione del segnale digitale applicato in ingresso e la corrispondente variazione del segnale analogico in uscita, e la **sensibilità termica**, definita dalla variazione del segnale di uscita del convertitore dovuta alla variazione della temperatura (a parità di codice binario applicato agli ingressi digitali).

Il segnale di uscita di un convertitore è affetto da una serie di errori, di cui i più comuni sono:

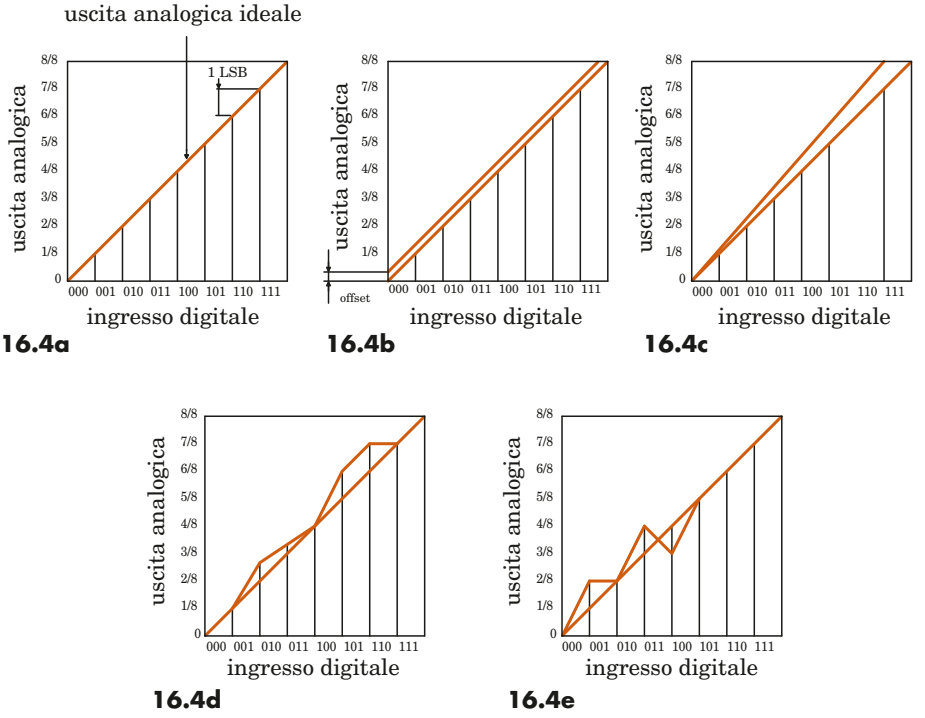
— **errore di offset**, quando l'uscita analogica, in corrispondenza del codice digitale nullo applicato in ingresso, è diversa da zero;
— **errore di guadagno**, quando l'uscita analogica, pur non presentando offset, ha un valore diverso da quello previsto; è dovuto principalmente all'imprecisione della resistenza di reazione del convertitore corrente-tensione che determina il valore del guadagno;

— **errore di linearità**, quando i segnali di uscita corrispondenti ai dati digitali non sono in relazione lineare fra loro;
— **errore di non monotonicità**, quando la non linearità della curva è molto accentuata e il diagramma di conversione mostra tratti a pendenza negativa.

I diagrammi che mostrano gli errori di offset (**fuori zero**), di guadagno e di linearità sono tracciati generando in ingresso al convertitore, in sequenza, tutti i codici ammessi, e misurando in uscita il corrispondente valore della tensione di uscita (▸ ***Figg. 16.4a-e***).

Un altro errore tipico dei D/A è rappresentato dall'**impulso spurio** (*glitch*). Quando un codice binario applicato a un D/A viene incrementato o decrementato con piccoli cambiamenti di codice, il circuito può talvolta generare in uscita un impulso di notevole ampiezza. La transizione più grande si ha in corrispondenza del valore di centro scala. Effettuando la transizione da 01111111 a 1000000, tutti gli interruttori interni del D/A cambiano di stato, e poiché il tempo di apertura degli interruttori è più lungo di quello di chiusura, si ha per un breve istante la generazione di un codice binario intermedio che viene convertito in uscita del D/A con un segnale nullo o con il valore di fondo scala.

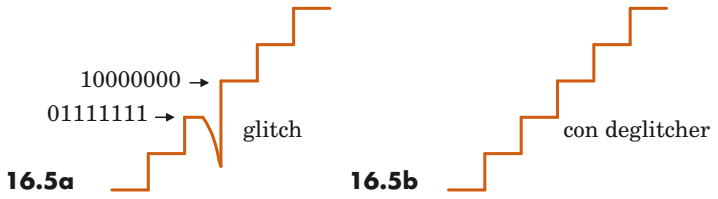
Figg. 16.4a-e
Relazione tra le grandezze di ingresso-uscita in una conversione D/A:
a. relazione ideale;
b. errore di offset;
c. errore di guadagno;
d. errore di linearità;
e. non monotonicità della curva di conversione.



Una volta commutati gli interruttori interni, la tensione di uscita del D/A si porta al valore corretto (▸ ***Figg. 16.5a, b***). Per ovviare a questo inconveniente si utilizza un **circuito di deglitcher**. L'impulso spurio può essere efficacemente eliminato utilizzando, in uscita al convertitore, un circuito sample-and-hold che mantiene la tensione di uscita analogica costante per tutto il tempo di commutazione degli interruttori interni.

I convertitori D/A utilizzati nell'interfacciamento di sistemi a bus hanno gli ingressi digitali disaccoppiati con D-latch attivato dal segnale di

sincronismo; in questo modo si riesce a mantenere costante il dato analogico in uscita tra due fasi attive del segnale di clock.



Figg. 16.5a, b
Impulsi spuri (glitch):
a. commutazione di codice che genera un impulso spurio;
b. effetto del circuito di deglitcher.

Rappresentazione grafica

Il convertitore D/A viene rappresentato, soprattutto nei fogli tecnici, come nella ***figura 16.6***.

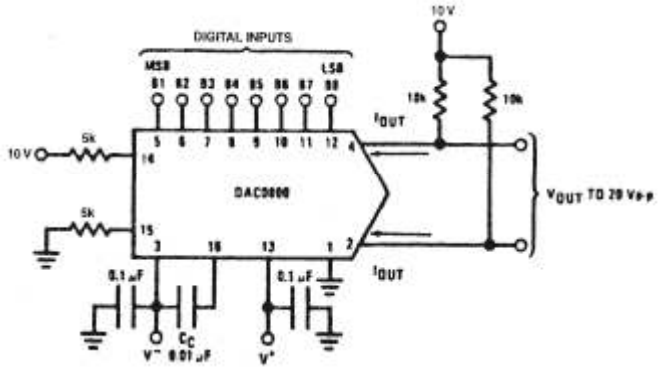


Fig. 16.6
Simbolo logico di un convertitore D/A.

Gli **ingressi** digitali sono posti su uno dei due lati lunghi del romboide in ordine di peso, dal più significativo al meno significativo. L'**uscita** o le uscite analogiche sono poste sulla punta del romboide o sui lati del triangolo. I **segnali di controllo**, per esempio la tensione di riferimento e di alimentazione, sono collegati sul lato lungo del romboide opposto a quello scelto per i collegamenti digitali.

Per il corretto funzionamento del circuito analogico-digitale è necessario che la parte digitale del circuito e quella analogica utilizzino percorsi di massa differenti. Il circuito digitale deve impiegare un percorso di ritorno di massa, comune a tutti i dispositivi digitali, mentre il circuito analogico deve avvalersi di un proprio percorso, comune a tutti i circuiti analogici. Graficamente questo tipo di connessione si rappresenta con due differenti simboli di riferimento: uno per la massa digitale e uno per la massa analogica. I due riferimenti di massa devono poi essere interconnessi nel punto di riferimento di massa dell'alimentatore.

Applicazioni

Il convertitore D/A viene utilizzato per produrre:
— convertitori ad approssimazioni successive;
— sintetizzatori di forme d'onda;
— circuiti sample-and-hold;
— rivelatori di picco;
— attenuatori e amplificatori programmabili in modo digitale;
— alimentatori programmabili.

Viene inoltre utilizzato per pilotare motori in corrente continua.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Che cos'è il campionamento?
2. Qual è la funzione di un convertitore D/A?
3. Da che cosa sono determinate la risoluzione e la precisione di un D/A?
4. Descrivi il funzionamento di un convertitore D/A a resistenze ponderate.
5. Descrivi il funzionamento di un convertitore D/A a rete resistiva tipo *R*-2*R*.
6. Quali sono le principali cause di errore di conversione di un D/A?

2 CONVERTITORI A/D

Abbiamo visto che il principio fondamentale su cui si basa la conversione analogico-digitale è la suddivisione del campo di variabilità della grandezza analogica da convertire in fasce di quantizzazione opportunamente codificate.

I convertitori A/D sfruttano due metodi di conversione:

1. le misure di tempo (convertitore a doppia rampa, a trasformazione tensione/frequenza);
2. il confronto con una grandezza di riferimento variabile (convertitore ad approssimazioni successive).

I convertitori A/D più usati sono:

— a gradinata (*staircase ramp*, *counting ADC*);
— asserviti (*tracking ADC*, *servo ADC*);
— ad approssimazioni successive;
— a singola rampa (*single-slope integrating*);
— a doppia rampa (*dual-slope integrating*, *up-down integrating*);
— a tripla rampa;
— a quadrupla rampa (*quad ramp integrating*);
— paralleli (*Flash*, *parallel*);

Nei paragrafi successivi analizzeremo solo i convertitori A/D ad approssimazioni successive, a doppia rampa e paralleli.

I convertitori A/D sono realizzati quasi sempre in forma integrata. Una realizzazione a componenti discreti è spesso sconsigliabile perché il segnale generato dalla conversione ha caratteristiche statiche e dinamiche modeste e in generale è poco affidabile.

Convertitori A/D ad approssimazioni successive

SAR
– Successive approximation register

Nei convertitori A/D ad approssimazioni successive **(SAR)** la conversione del segnale analogico di ingresso viene effettuata generando all'interno del dispositivo, con un convertitore D/A, una tensione analogica che approssimi con un errore minimo la tensione di ingresso incognita (▸ ***Fig. 16.7***).

MSB
– Most significant bit

La tensione di riferimento interna al dispositivo viene ottenuta scrivendo inizialmente nel registro a *n*-bit che alimenta il convertitore D/A, il valore di centro scala, il bit più significativo **(MSB)** posto a 1. La tensione analogica generata dal convertitore D/A viene comparata con quella del segnale di ingresso: se quest'ultima risulta inferiore a quella di riferimento, il bit più significativo del registro viene azzerato. Il passo successivo richiede che il bit successivo di peso *n*-1 venga posto a 1; la successiva comparazione confermerà tale valore o lo azzererà. L'operazione viene

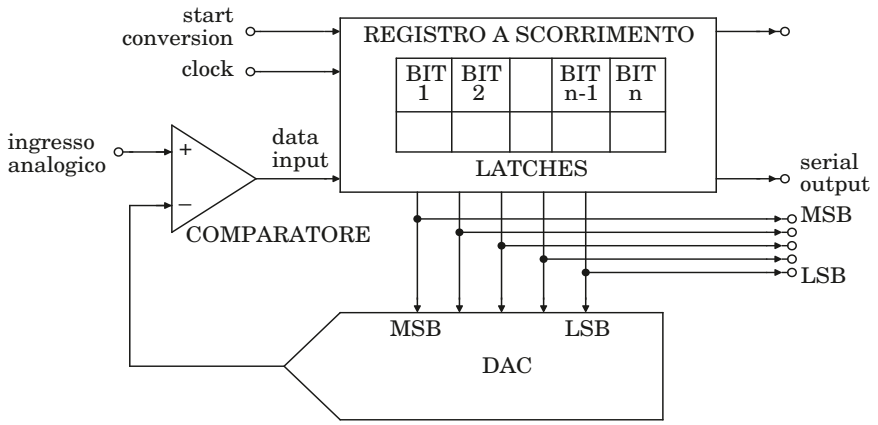


Fig. 16.7
Convertitore A/D ad approssimazioni successive.

ripetuta per tutti gli n-bit che compongono il registro, cioè fino al meno significativo (LSB) (▸ ***Fig. 16.8***).

Un segnale di stato, comunemente chiamato **EOC**, segnala l'avvenuta conversione del segnale di ingresso.

Il tempo di conversione di questo tipo di convertitori è basso (dell'ordine dei microsecondi) e dipende, in parte, dalla frequenza del segnale di clock che può essere generato da circuiti posti all'interno o all'esterno del convertitore stesso.

LSB
– Least significant bit
EOC
– End of conversion

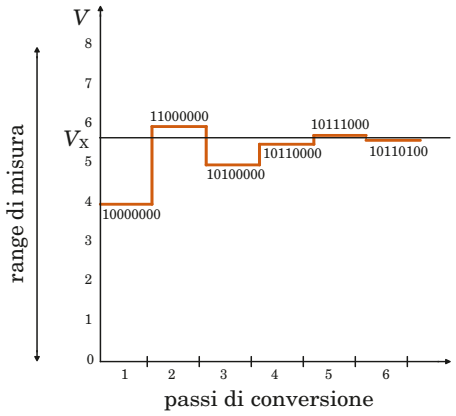


Fig. 16.8
Diagramma di conversione di un convertitore A/D ad approssimazioni successive.

Convertitori A/D a integrazione

Il convertitore analogico digitale a integrazione effettua la conversione del segnale analogico di ingresso misurando un intervallo di tempo. Il circuito principale del convertitore è un integratore realizzato con un amplificatore operazionale. Tre sono le configurazioni circuitali possibili: a 2, a 3 e a 4 rampe. La ***figura 16.9*** mostra lo schema a blocchi di questo convertitore.
La ***figura 16.10*** mostra il diagramma tensione-tempo di un convertitore a integrazione. Il segnale analogico da convertire viene inizialmente applicato all'ingresso del circuito integratore per un tempo prefissato e costante T_r. La tensione di uscita raggiunge un valore assoluto che dipende dal segnale analogico di ingresso. Terminata la temporizzazione, il segnale in ingresso è sostituito da una tensione costante di riferimento V_r di segno opposto a quella del segnale da convertire. L'integratore tornerà quindi alle condizioni iniziali, cioè a quelle che possedeva prima dell'applicazione del segnale analogico, in un tempo T_s che è direttamente proporzionale alla tensione analogica del segnale che si sta convertendo.

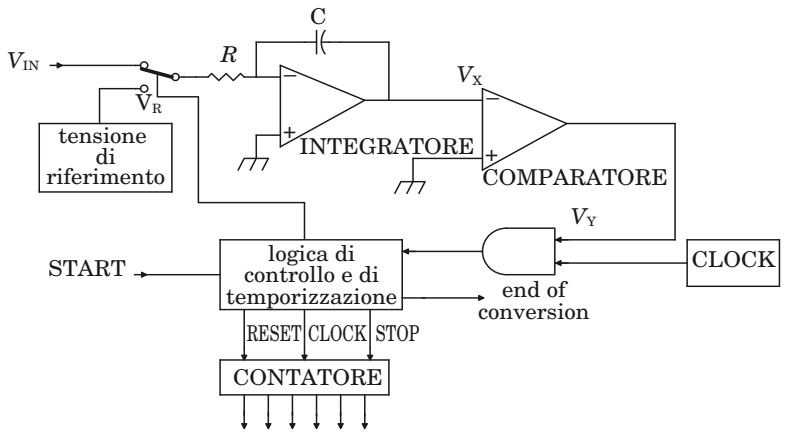


Fig. 16.9
Schema a blocchi di un convertitore A/D a integrazione.

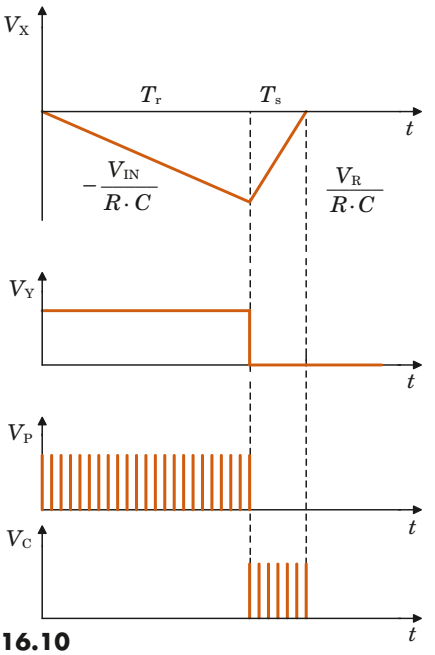


Fig. 16.10
Forme d'onda di un convertitore A/D a integrazione.

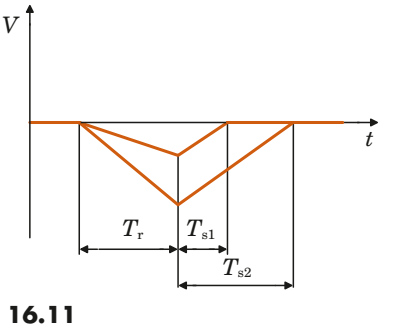


Fig. 16.11
Curve di integrazione prodotte da differenti valori di tensione analogica applicata in ingresso.

Il valore numerico binario si ottiene contando gli impulsi generati da un oscillatore a frequenza fissa nel periodo T_s (▸ ***Fig. 16.11***).
La deriva termica della tensione di offset dell'amplificatore operazionale che realizza l'integratore costituisce uno dei principali inconvenienti di questo tipo di convertitore. L'inconveniente viene superato realizzando convertitori con quattro rampe. Le prime due rampe effettuano una lettura di calibrazione che viene utilizzata per determinare l'esatta durata del tempo di riferimento T_r da impiegare nella lettura della tensione analogica da convertire.

Il tempo di conversione dei convertitori a doppia rampa è abbastanza lento: da 4 a 300 ms; sono quindi utilizzabili solo quando la grandezza di ingresso varia lentamente nel tempo.

Convertitori A/D paralleli

Nei convertitori A/D di tipo parallelo (*Flash converter*) il segnale analogico da misurare viene applicato contemporaneamente a un ingresso di 2^n-1 comparatori analogici, dove n è il numero di bit di risoluzione del comparatore. All'altro ingresso di ogni comparatore del convertitore viene appli-

cata una tensione di riferimento ricavata da una rete di $n + 1$ resistori. Le uscite dei comparatori vengono poi codificate in codice binario e memorizzate in un registro di uscita (*latch*). La ***figura 16.12*** mostra un convertitore parallelo con tre bit di codice di uscita ($n = 3$).

I comparatori si portano al livello logico alto ogniqualvolta la tensione applicata al loro morsetto non invertente supera la tensione di riferimento imposta al loro morsetto invertente dal partitore resistivo. Il codice binario generato dai comparatori è applicato a un codificatore a priorità che converte il codice in ingresso in numero binario.

Il tempo di conversione di questi convertitori è estremamente elevato: un convertitore con 8 bit di uscita ha, in genere, un tempo di conversione dell'ordine di 50 ns.

Questi convertitori vengono realizzati su un'unica piastrina di silicio (*chip*) e la loro messa a punto richiede la soluzione di problemi tecnologici estremamente complessi poiché occorre realizzare un numero elevato di comparatori identici e le reti di resistori, che determinano i livelli di tensione di riferimento, devono essere precise, molto stabili nel tempo e prive di derive termiche.

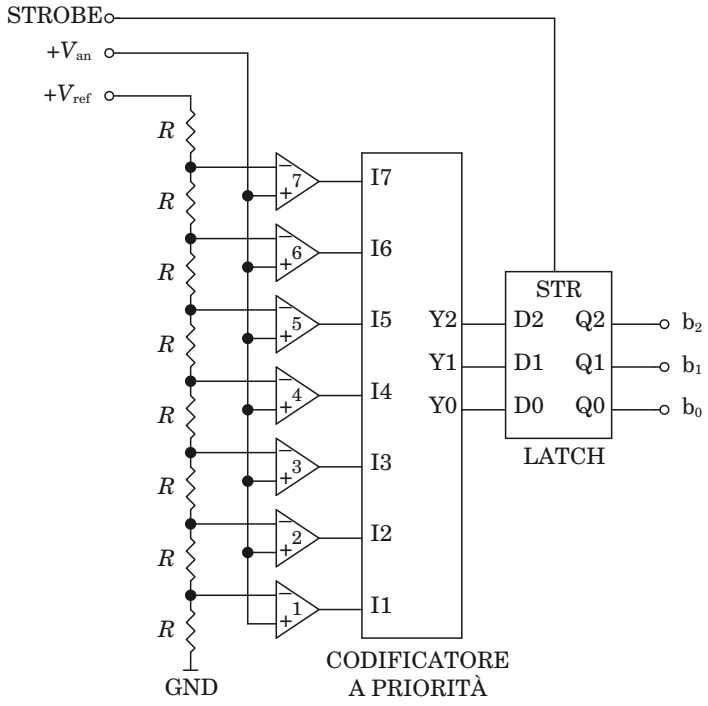


Fig. 16.12
Schema a blocchi di un convertitore A/D parallelo.

Caratteristiche dei convertitori A/D

Le principali caratteristiche dei convertitori A/D sono:

— la **precisione**, data dalla differenza tra il valore convertito e il valore reale della grandezza che si misura; eventuali errori dipendono dalle derive dei parametri dovute all'invecchiamento dei componenti o al cambiamento delle condizioni ambientali, e da eventuali non linearità di comportamento del dispositivo;

— la **sensibilità**, data dal più piccolo valore che può essere convertito;

— il **potere risolutivo**, consistente nella più piccola variazione della tensione in ingresso che provoca una variazione di codice in uscita;

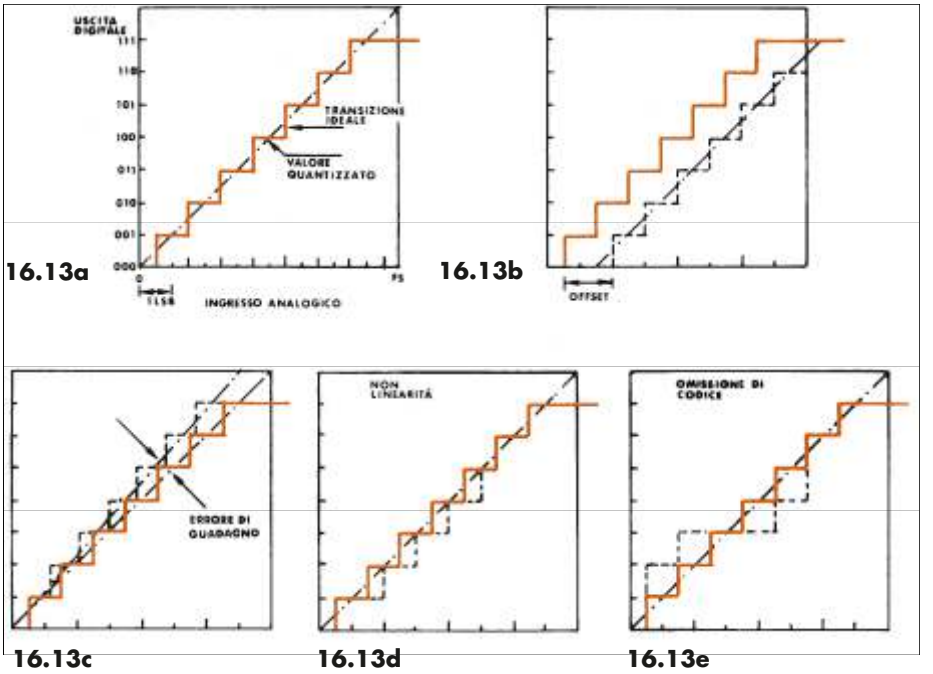
— il **tempo di conversione**, è il tempo impiegato dal circuito per convertire il segnale analogico nella cifra binaria in uscita; dipende dal metodo di conversione adottato e varia da qualche nanosecondo ad alcuni microsecondi.

La sensibilità di un convertitore può essere migliorata modificando il campo di variazione del segnale di ingresso da convertire in modo da portarlo nel campo di misura del convertitore prescelto. Quest'operazione viene compiuta con amplificatori che adattano il segnale del trasduttore a quello utilizzabile dal convertitore. Talvolta questi amplificatori sono programmabili digitalmente attraverso opportuni ingressi, per cui è possibile, sotto controllo di un elaboratore, modificare le caratteristiche del segnale di ingresso così da mantenere elevate sensibilità anche con segnali che presentano un ampio campo di variazione.

Errori dei convertitori A/D

Gli errori tipici in una conversione analogico-digitale sono (▸ ***Figg. 16.13a-e***):

— **di offset**, la prima transizione di livello (bit meno significativo) in uscita può avvenire a ± 1/2 LSB;
— **di guadagno**, è pari alla differenza tra i valori relativi all'ultima e alla prima transizione;
— **di linearità differenziale**, è dato dalla differenza tra il valore reale e il valore teorico della variazione di tensione di ingresso che genera in uscita due codici differenti;
— **di linearità integrale**, è la misura della curvatura della funzione di trasferimento reale rispetto alla retta che rappresenta la funzione di trasferimento ideale;
— **di omissione di codice**, si manifesta quando non tutti i codici vengono generati in uscita.



Figg. 16.13a-e
Curve caratteristiche di uscita di un convertitore A/D:
a. relazione ideale;
b. errore di offset;
c. errore di guadagno;
d. errore di linearità;
e. omissione di codice.

— curva ideale
----- curva reale

Gli errori sono generati dal tempo di risposta finito dei comparatori analogici, dai tempi di assestamento dei circuiti termici, dalle derive termiche e dal fenomeno detto **incertezza d'apertura**.

L'incertezza d'apertura dipende dalle variazioni del segnale di ingresso e dal ritardo esistente fra il comando di inizio della conversione e l'inizio effettivo della misura. Se, durante il tempo di conversione, la grandezza di ingresso modifica il suo valore, è possibile che alcuni degli errori descritti diventino significativi. L'incertezza d'apertura, dovuta alle variazioni del segnale di misura durante il ciclo di conversione, può essere in parte corretta inserendo nel circuito di ingresso un circuito sample-and-hold (▸ ***Fig. 16.14***) che mantiene il segnale di ingresso costante durante la conversione. In assenza del circuito sample-and-hold, la variazione del segnale di ingresso, durante il tempo di conversione, dev'essere contenuta entro 1/2 LSB.

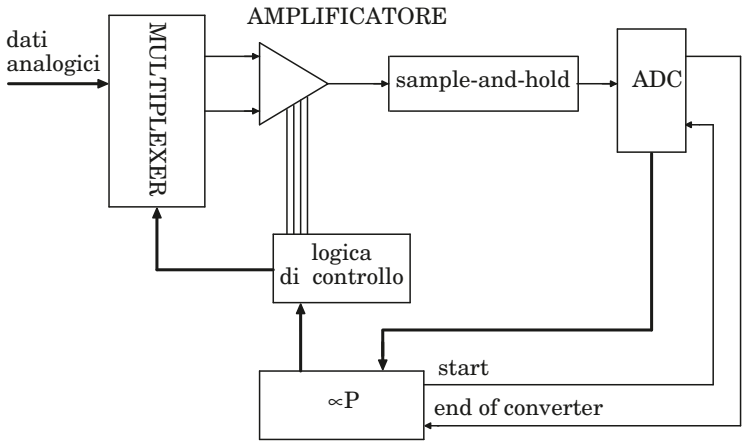


Fig. 16.14
Utilizzo del circuito di sample-and-hold per correggere l'errore dovuto all'incertezza d'apertura.

Il circuito sample-and-hold (▸ ***Vol. 2, Mod. D, Cap. 12***) è utilizzato quando la grandezza da misurare varia molto rapidamente, e comunque prima che la conversione sia terminata. Questo circuito memorizza (*hold*) il valore analogico presente al suo ingresso quando viene fornito un comando di campionamento (*sample*); ciò permette di mantenere costante il segnale all'ingresso del convertitore per tutto il tempo di conversione.

Il processo di conversione avviene in un tempo finito, per cui le acquisizioni di due dati di ingresso successivi sono separate da un intervallo di tempo finito. La lettura dei dati, per non alterare l'informazione, dev'essere adeguata alla velocità di variazione dei dati.

Il **teorema del campionamento di Shannon** afferma che un segnale, per essere ricostruito univocamente, dev'essere campionato con una frequenza doppia rispetto a quella massima presente nel segnale, cioè:

$$f_c \geq 2 f_b \qquad \textbf{16.6}$$

dove:

f_c è la frequenza di campionamento
f_b è la massima frequenza dell'armonica più significativa presente nel segnale di ingresso

Se si effettua un campionamento a una frequenza inferiore si ha una perdita di informazione; per non basare la scelta della frequenza di campionamento su una congettura sul valore reale della larghezza di banda del segnale di ingresso è opportuno inserire, in ingresso, un filtro passa-basso che limiti la massima frequenza del segnale e che elimini la componente di rumore in alta frequenza in esso presente. Il periodo di campionamento T_c è quindi dato dalla seguente relazione:

$$T_c = \frac{1}{f_c} = \frac{1}{2f_b} \qquad \textbf{16.7}$$

Il tempo reale di campionamento dev'essere comunque inferiore a questo valore, perché bisogna tener conto del tempo di conversione del convertitore e delle elaborazioni successive del valore numerico ottenuto dall'elaboratore (memorizzazione, calcoli di conversione, eventuale riconversione in forma analogica mediante D/A).

Se il tempo di conversione di un D/A è di 15 μs, i segnali da convertire non devono contenere armoniche significative superiori a:

$$f_b = \frac{1}{2\,t_c} = \frac{1}{30 \times 10^{-6}} = 33{,}3 \text{ kHz} \qquad \textbf{16.8}$$

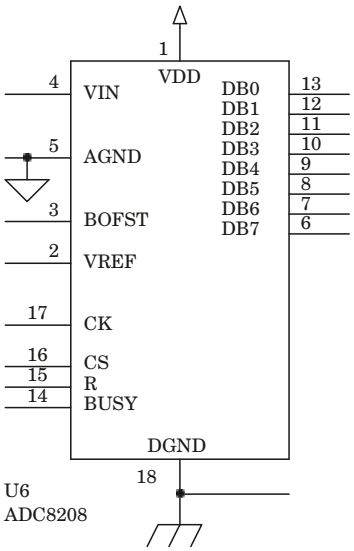


Fig. 16.15
Simbolo grafico di un convertitore D/A.

Rappresentazione grafica

I convertitori A/D vengono in genere rappresentati utilizzando un rettangolo e adottando tutte le convenzioni grafiche usate per i microcircuiti generici (▸ ***Fig. 16.15***). Occorre però fare attenzione al fatto che in genere la connessione di riferimento (massa) per la parte analogica, e quella per la parte digitale del componente, devono essere mantenute separate: per identificare i due riferimenti di massa è dunque opportuno utilizzare due simboli grafici differenti. Il collegamento di massa analogico viene poi riunito con quello digitale sull'alimentatore o sui morsetti di ingresso del circuito.

Questa informazione è particolarmente utile e importante quando lo schema verrà impiegato per produrre i disegni di fabbricazione del circuito stampato (*master*). Il disegnatore dovrà infatti prevedere, per la massa analogica e per quella digitale, due percorsi distinti, e possibilmente mantenere la parte analogica dello schema distante da quella digitale. Questo accorgimento costruttivo eviterà che il circuito analogico sia disturbato dalle commutazioni del circuito digitale e che la parte analogica alteri i livelli logici dei segnali digitali scambiati fra le diverse unità logiche.

3 CONVERTITORI TENSIONE/FREQUENZA E FREQUENZA/TENSIONE

Convertitori tensione/frequenza

VFC
– Voltage-to-frequency converter

I convertitori tensione/requenza **(VFC)** generano, come segnale di uscita, una serie di impulsi o un'onda quadra in una forma compatibile con una famiglia micrologica (di solito TTL). La frequenza del segnale di uscita è proporzionale al valore della tensione applicata in ingresso.

Gli errori tipici di un convertitore VFC sono di fuori zero (*offset*), di linearità e di guadagno.

I parametri più importanti che ne definiscono le caratteristiche sono:

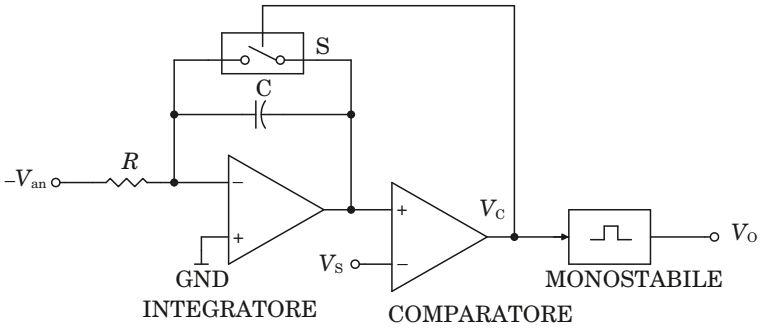
— la **portata dinamica** (*dynamic range*), definita dal rapporto fra il massimo e il minimo segnale utile applicato in ingresso (espresso in dB);
— il **tempo di risposta** (*response time*) intercorrente fra una variazione del segnale di ingresso analogico e l'assestamento del valore di frequenza in uscita.

Esistono vari tipi di circuito usabili per realizzare un convertitore VFC; i più usati sono quelli **a rampa e soglia** (*ramp-threshold*) e a **bilanciamento di carica** (*charge balancing*).

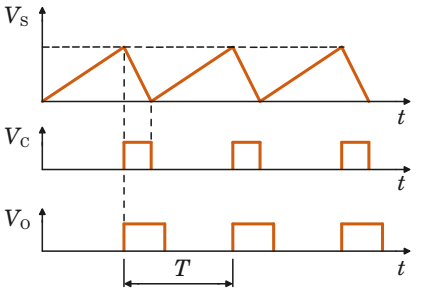
Il metodo di conversione **a rampa e soglia** si basa sull'integrazione del segnale di ingresso e sulla generazione di un impulso da parte di un circuito monostabile quando la tensione dell'integratore raggiunge un valore di soglia predeterminato. Gli impulsi vengono generati, più o meno frequentemente, in funzione del valore della costante di integrazione e del valore della tensione di soglia.

Le ***figure 16.16a, b*** mostrano uno schema a blocchi semplificato di un convertitore a rampa e soglia. Il segnale di ingresso è applicato a un circuito integratore, la cui uscita viene poi paragonata con una tensione di riferimento. Quando la tensione in uscita all'integratore supera questo valore, il comparatore commuta. Il circuito monostabile rileva l'avvenuta transizione di livello del segnale applicato in ingresso e genera in uscita un impulso di durata costante. L'interruttore S si chiude, scaricando il condensatore e ripristinando le condizioni iniziali. Il ciclo di misura a questo punto si ripete. È evidente che quanto più ripida è la pendenza della rampa dell'integratore tanto maggiore è il numero di impulsi generati, e quindi tanto maggiore è la risoluzione del convertitore.

Figg. 16.16a, b
VFC a rampa e soglia:
a. schema a blocchi;
b. forme d'onda.



16.16a



16.16b

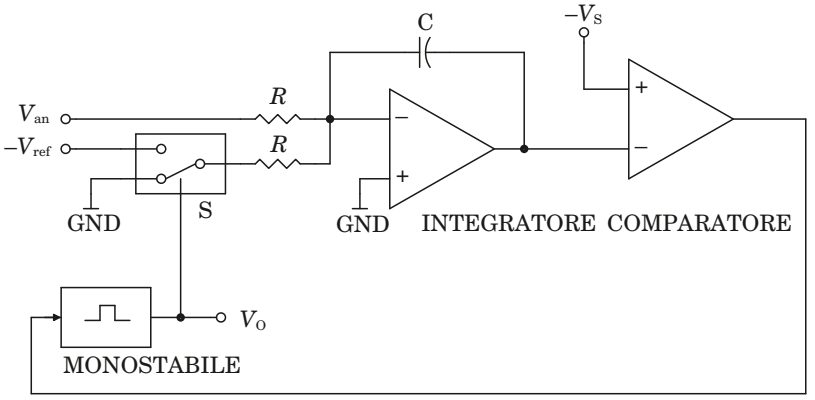
Il convertitore **a bilanciamento di carica** esegue il ciclo di conversione utilizzando due rampe di tensione: una a pendenza negativa e una a pendenza positiva. La rampa a pendenza negativa dipende dal segnale applicato in ingresso. La tensione di uscita dell'integratore viene confrontata per mezzo di un comparatore con una tensione di riferimento. Il comparatore comanda, a sua volta, un circuito monostabile che genera un impulso in uscita di durata T_a.

Il multivibratore commuta anche il segnale di ingresso applicato all'integratore, collegando al posto del segnale analogico una tensione di riferimento che genera una rampa a pendenza positiva per tutto il tempo T_a. Quando l'impulso si esaurisce, il commutatore ritorna nella posizione originaria riconnettendo il segnale analogico al circuito integratore, che

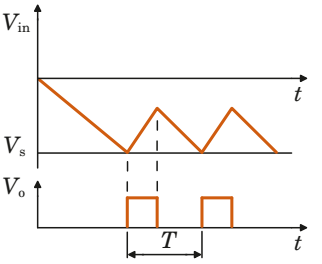
ora genererà una rampa a pendenza negativa. Questo tipo di convertitore presenta una relazione tensione/frequenza più lineare rispetto al tipo a rampa e soglia.

Le ***figure 16.17a, b*** mostrano lo schema a blocchi semplificato di un convertitore a bilanciamento di carica.

Figg. 16.17a, b
VFC a bilanciamento di carica:
a. schema a blocchi;
b. forme d'onda.



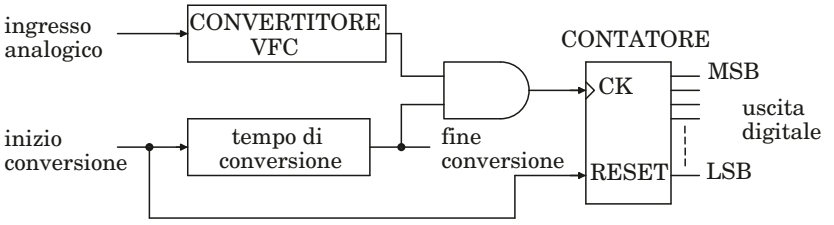
16.17a



16.17b

I convertitori VFC vengono utilizzati nei **voltmetri digitali** (*digital pannel meter*) e nei convertitori analogico-digitali che devono possedere un alto valore di risoluzione (▸ ***Fig. 16.18***). La conversione A/D viene fatta inviando il segnale prodotto dal convertitore tensione/frequenza, per un tempo prefissato, a un contatore digitale. La precisione della conversione dipende dal tempo di acquisizione prescelto e dal modulo del contatore.

Fig. 16.18
Schema a blocchi di un convertitore A/D che utilizza un VFC.



Come per altre importanti configurazioni circuitali, anche i convertitori VFC non sono quasi mai realizzati con componenti discreti perché esistono moltissimi microcircuiti che offrono a basso costo buone, o ottime, caratteristiche di conversione. Fra i più noti citiamo:
— AD 437, AD 450, AD 454 della Analog Devices;
— VFC32, VFC62, VFC320 della Burr-Brown, l'ultimo dei quali può eseguire conversioni sia tensione/frequenza sia frequenza/tensione.

Convertitori frequenza/tensione

FVC
– Frequency-to-voltage converter

I convertitori frequenza/tensione **(FVC)** realizzano un'elaborazione dei segnali opposta rispetto a quella effettuata dai convertitori tensione/frequenza: accettano una forma d'onda periodica in ingresso e producono in uscita una tensione proporzionale alla frequenza.

Le principali caratteristiche elettriche di un convertitore FVC sono:
— il **campo di variazione della frequenza** (*frequency range*), quanto più è ampio tanto maggiore è la risoluzione del convertitore;

— il **tempo di risposta** (*step response*), tempo richiesto dal convertitore per modificare l'uscita applicando in ingresso variazioni di frequenza che interessano l'intera scala di misura (tipicamente qualche millisecondo);
— gli **errori di calibrazione** a fondo scala, espressi come valori percentuali rispetto al valore di fondo scala;
— l'**errore di linearità**, espresso come valore percentuale rispetto al valore di fondo scala.

Anche i convertitori FVC non vengono quasi mai realizzati con componenti discreti perché esistono molti microcircuiti che offrono a basso costo buone, o ottime, caratteristiche di conversione. Sono microcircuiti convertitori:
— AD 451, AD 453 della Analog Devices;
— VFC320 della Burr-Brown, che può eseguire conversioni sia frequenza/tensione che tensione/frequenza.

I convertitori di questo tipo sono usati principalmente nei controlli di velocità dei motori e nel controllo della frequenza della tensione di rete.

Nelle trasmissioni segnale analogico-segnale analogico, il trasmettitore effettua una conversione V/F del segnale analogico da trasmettere (VFC), successivamente l'informazione digitale ottenuta viene trasmessa in modo seriale; nel punto di ricezione, il segnale analogico viene ricostruito dal segnale digitale trasmesso mediante una conversione frequenza/tensione (FVC).

PER FISSARE I CONCETTI

1. Con quali metodi si può effettuare una conversione analogico-digitale?
2. Descrivi il funzionamento di un convertitore A/D ad approssimazioni successive.
3. Descrivi il funzionamento di un convertitore A/D a doppia rampa.
4. Descrivi il funzionamento di un convertitore A/D Flash.
5. Qual è la funzione di un circuito sample-and-hold posto nello stadio di ingresso di un convertitore A/D?
6. Determina la frequenza di campionamento di un segnale audio con frequenza massima di 15 KHz.
7. Qual è la funzione di un filtro passa-basso posto in ingresso a un convertitore A/D?
8. Definisci le seguenti grandezze che caratterizzano i convertitori A/D: precisione, sensibilità, potere risolutivo, tempo di conversione.
9. Quali errori fondamentali possono avvenire in un processo di conversione A/D?
10. Che cos'è un convertitore tensione/frequenza? Quali impieghi pratici può avere?
11. Che cos'è un convertitore frequenza/tensione? Quali impieghi pratici può avere?

A.1 APPLICAZIONI

STRUMENTO DI MISURA DIGITALE

Lo strumento che analizziamo in questo esercizio applicativo misura una tensione applicata in ingresso e fornisce in uscita il corrispondente valore in forma decimale su un display a 3 cifre.

Il circuito proposto nella ***tavola 16.1*** si compone dei seguenti elementi funzionali:

— un circuito adattatore per il segnale di ingresso;
— un convertitore della grandezza analogica da misurare in una grandezza digitale espressa in numeri decimali in codice binario (BCD);
— un'unità logica di generazione dei segnali digitali con la tecnica a multiplexer.

L'adattatore di ingresso, formato dal partitore di tensione Ra-Rb e dal filtro di ingresso R1-C5, trasforma i segnali che possono assumere un valore qualsiasi in segnali compatibili con il campo di misura ammesso dal convertitore utilizzato. Il circuito, di norma, è più complesso: si avvale di amplificatori operazionali per bufferare, amplificare, attenuare, linearizzare il segnale prima di applicarlo all'ingresso del convertitore.

Il convertitore impiegato è un A/D a doppia rampa prodotto dalla RCA: il CA3162E. La ***figura 16.19*** mostra il suo schema a blocchi. Il dispositivo è provvisto di terminali che consentono di regolare lo zero (*offset*) e il livello della tensione di riferimento. La costante di integrazione può essere regolata modificando il valore del condensatore di integrazione (pin 12).

Le uscite digitali sono fornite con la tecnica di visualizzazione a multiplexer: sono disponibili 4 linee di segnale che forniscono le cifre, espresse in codice BCD, e 3 linee di scansione che controllano la sequenza di comando dei display.

Le tre sigle utilizzate nello schema a blocchi significano:

— **MSD**, cifra di peso superiore;
— **NSD**, cifra di peso intermedio;
— **LSD**, cifra di peso inferiore.

MSD
– Most significant digit
NSD
– Next significant digit
LSD
– Least significant digit

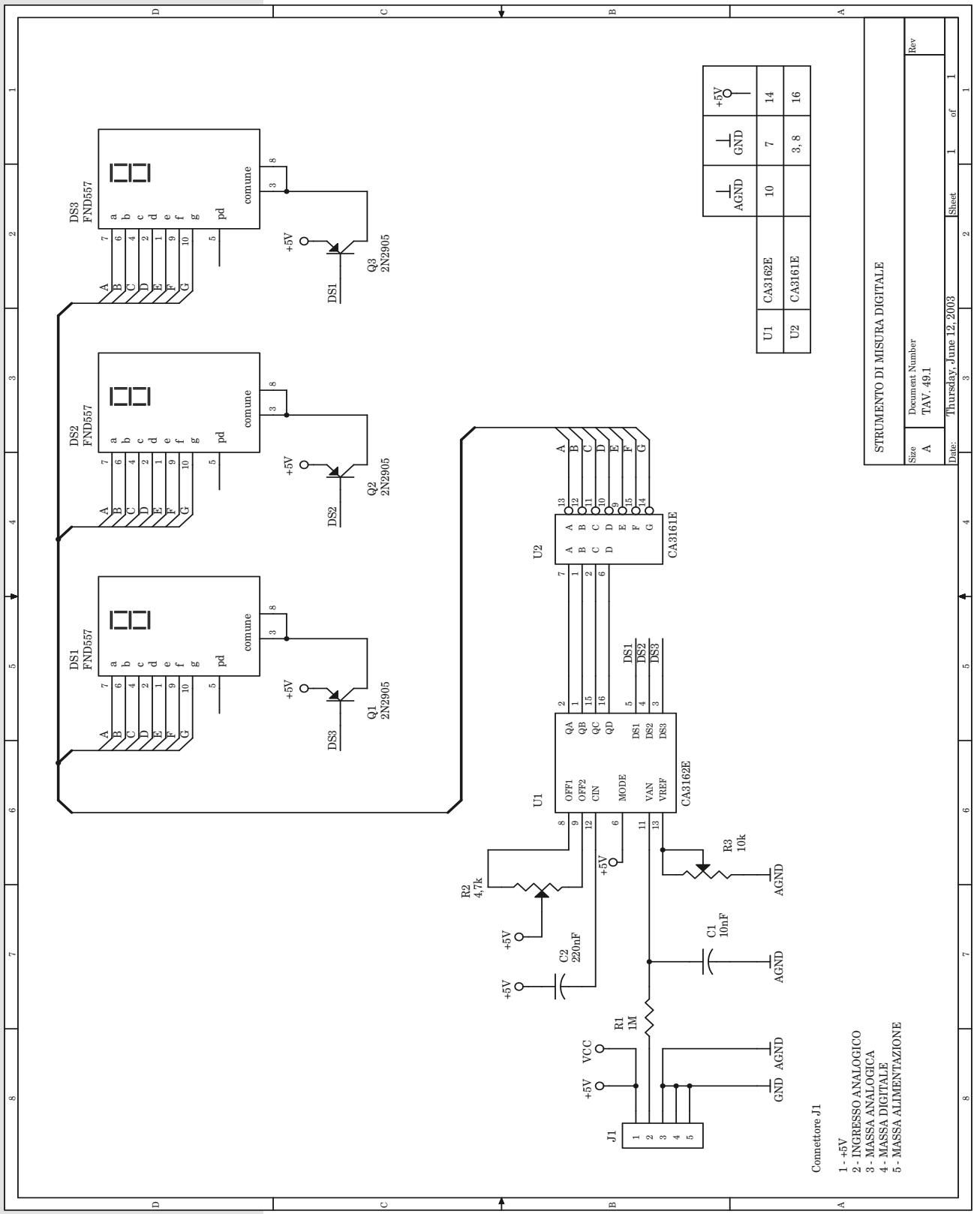
Il dispositivo è provvisto di un oscillatore che, attraverso il circuito logico interno, sincronizza la generazione delle uscite digitali e, grazie a un'opportuna divisione di frequenza interna, controlla la durata del ciclo di conversione attraverso la linea di hold/bypass. Se questa linea viene posta al potenziale di alimentazione, il ciclo di conversione è di 96 Hz, cioè il microcircuito effettua 96 conversioni al secondo; se si lascia il terminale sconnesso o collegato a massa, il ciclo di conversione scende a 4 Hz (4 conversioni al secondo). Se si collega il terminale a una tensione pari alla metà di quella di alimentazione, il circuito si pone nello stato di hold, mantiene visualizzato il dato dell'ultima conversione e non effettua ulteriori conversioni.

Il valore della tensione di controllo è facilmente ottenibile collegando, fra alimentazione e massa, un partitore formato da due resistenze dello stesso valore. La tensione massima ammissibile all'ingresso è compresa fra –99 e +999 mV.

Per misurare tensioni superiori occorre progettare il circuito adattatore di ingresso in modo che trasformi il campo di variazione della grandezza di ingresso in quello massimo applicabile a questo microcircuito.

TAVOLA 16.1

Strumento di misura digitale: schema elettrico.



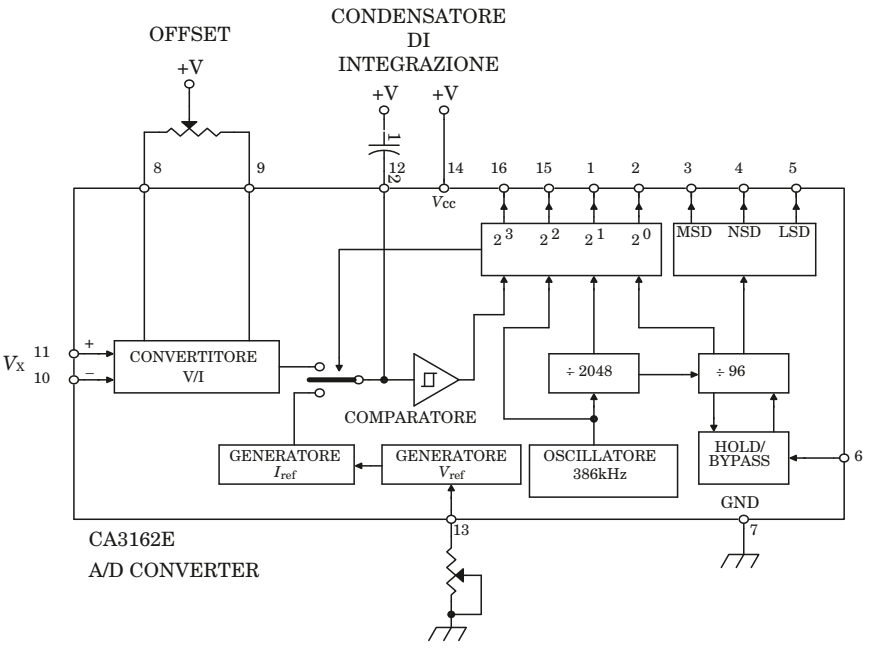


Fig. 16.19
Schema a blocchi del convertitore a doppia rampa CA3162.

La cifra decimale in uscita può essere convertita da un qualsiasi decodificatore BCD-7 segmenti. Nel circuito proposto si è utilizzato il microcircuito CA3161E, un decodificatore sviluppato dalla RCA appositamente per essere impiegato insieme al convertitore analogico che abbiamo descritto. Questo microcircuito possiede al suo interno dei buffer/driver che sono in grado di fornire una corrente costante sufficiente per pilotare i led dei display, senza richiedere l'uso delle resistenze di limitazione di corrente esterne come accade, per esempio, con il decodificatore BCD-7 segmenti 7447.

In uscita, oltre alle 10 cifre decimali, con i codici ridondanti genera anche le lettere H, L, P e l'operatore di segno meno (-). Quando la tensione di ingresso al convertitore è tale da dare un errore di supero della capacità, cioè viene applicata una tensione superiore a +999 mV (*overrange*), il codice generato dal convertitore è 1010, che applicato al decodificatore CA3161E fa comparire sul display tre lettere E. Se invece la tensione di ingresso è inferiore a –99 mV si ha un errore di sottomisura (*underrange*) e sul display compaiono tre segni meno (---).

L'elenco dei componenti dello strumento è mostrato nella ***tabella 16.1***.

Il progetto del circuito stampato dello strumento dev'essere realizzato mantenendo separati i collegamenti di massa della parte digitale da quelli dell'analogica, utilizzando percorsi di connessione differenti.

L'informazione va inserita nello schema elettrico ricorrendo a due sigle di identificazione dei segnali di massa diverse; nella tavola 16.1 si è usata la sigla GND per la massa digitale e AGND per la massa analogica, scollegando i due percorsi come mostra la ***figura 16.20***.

Una volta terminato lo sbroglio della scheda manualmente si assegna, con il comando edit di OrCAD/PCB, lo stesso nome di identificazione (per esempio, AGND viene rinominata GND), si disattiva il controllo DRC nel comando set e si traccia la pista di connessione fra i due terminali di massa.

La ***tavola 16.2*** mostra i disegni di fabbricazione del circuito stampato dello strumento.

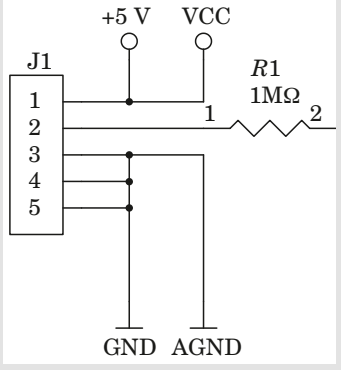


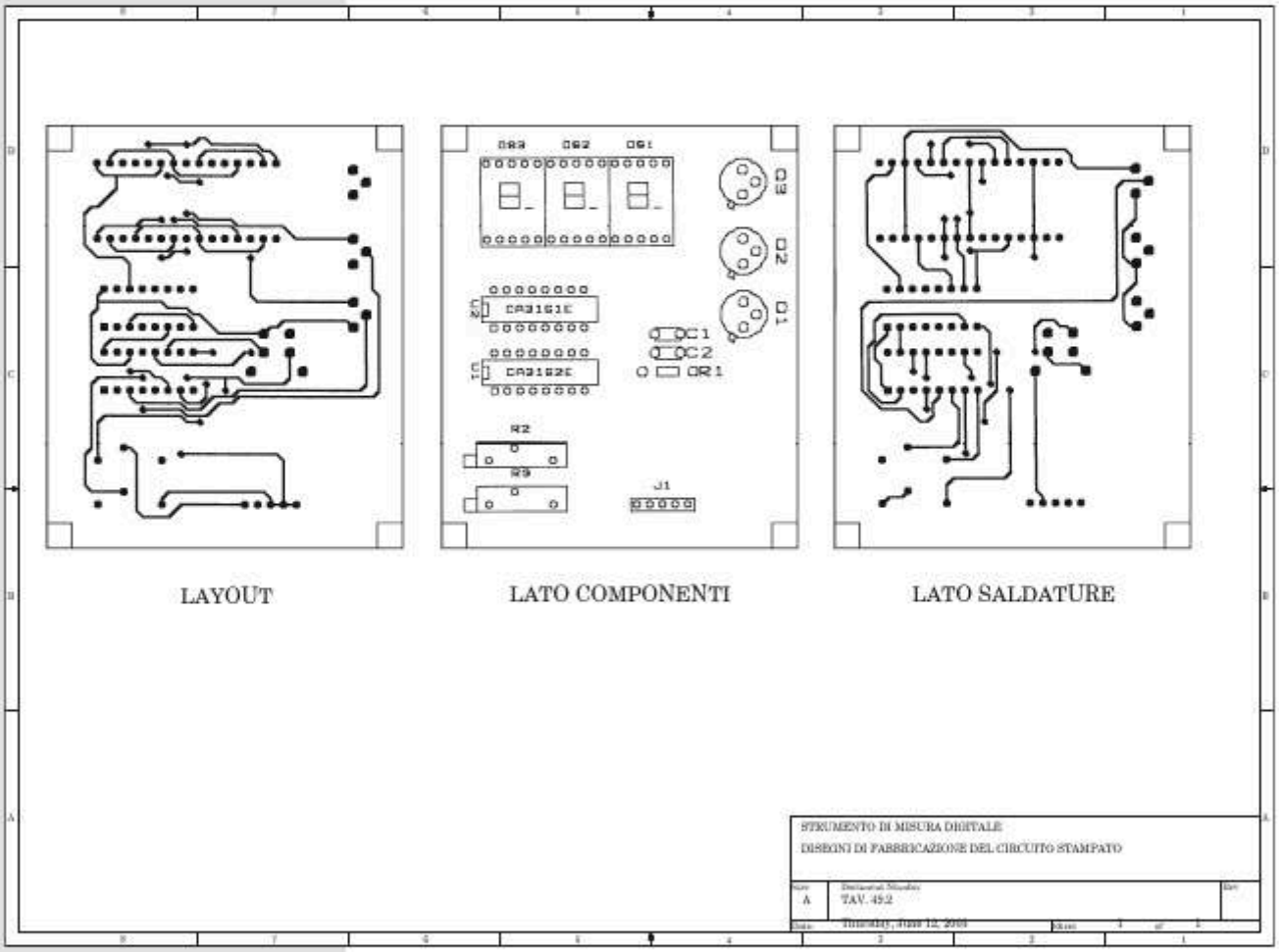
Fig. 16.20
Modifica delle connessioni di massa necessarie per forzare il programma CAD a seguire percorsi di connessione separati.

Tabella 16.1 Strumento di misura digitale: elenco dei componenti della scheda a circuito stampato

N.	SIGLA	DESCRIZIONE			
1	C1	condensatore	10 nF	100 V	poliestere
1	C2	condensatore	220 nF	100 V	ceramico
3	DS1, DS2, DS3	display	FND557 ad anodo comune		
1	J1	connettore	a 5 poli a innesto		
3	Q1, Q2, Q3	transistor BJT	2N2905 PNP case TO-5		
1	R1	resistenza	1 MΩ	1/4 W	5% a strato
1	R2	trimmer	4,7 kΩ		lineare, multigiri
1	R3	trimmer	100 kΩ		lineare, multigiri
1	U1	IC LIN	CA3162E		
1	U2	IC LIN	CA31621		

TAVOLA 16.2

Strumento di misura digitale: disegni di fabbricazione del circuito stampato.



Taratura dello strumento

Per tarare lo strumento occorre disporre di una tensione di riferimento precisa e stabile, nel tempo e al variare della temperatura. Per una taratura precisa occorre avvalersi di un microcircuito generatore di tensioni di riferimento di precisione, quale LH070 o simili, che garantiscono in usci-

ta una tensione campione affidabile. Se si può accettare una calibrazione più approssimata si possono usare anche pile (3% di tolleranza) o diodi Zener (5% di tolleranza).

Occorre effettuare due calibrazioni: una di zero e una di scala, preferibilmente di fondo scala. La taratura di zero viene effettuata cortocircuitando l'ingresso dello strumento e regolando il potenziometro $R1$ finché non si legge zero sul display. La calibrazione di scala si effettua collegando la tensione campione all'ingresso e regolando la resistenza variabile $R2$ finché sul display non si legge il valore corrispondente alla tensione campione. Ricordiamo che la tensione da utilizzare per la taratura dev'essere compresa nel campo di misura del convertitore.

ESERCIZI

1.1 Ridisegna lo schema proposto nella tavola 16.1 sostituendo l'adattatore di ingresso con un partitore di ingresso che permetta di misurare a fondo scala tensioni di 100 mV, 1 V, 10 V, 100 V. La selezione delle portate va effettuata con un commutatore rotativo (4 posizioni una via).

1.2 Ridisegna lo schema proposto nella tavola 16.1 sostituendo l'adattatore di ingresso con un amplificatore operazionale che permetta di misurare segnali che variano da 0 a +10 V.

1.3 Aggiungi la possibilità di selezionare, manualmente o con un comando digitale, uno dei tre modi operativi del convertitore.

1.4 Utilizzando la lista dei collegamenti scaricabile dal sito Internet disegna un nuovo circuito stampato posizionando i dispositivi in modo diverso.

A.2

CONVERTITORE DIGITALE-ANALOGICO UNIPOLARE

La ***tavola 16.3*** mostra lo schema elettrico di un convertitore digitale-analogico unipolare.

Il microcircuito ZN428 della Ferranti (▸ ***Fig. 16.21***) è un convertitore D/A a tensione di alimentazione singola (+5 ÷ +7 V) che contiene al suo interno la rete resistiva R-$2R$, gli interruttori analogici e un registro latch che memorizza il dato in ingresso. I livelli logici degli ingressi sono compatibili con quelli TTL e CMOS alimentati a +5 V.

Il convertitore corrente-tensione è interno al componente e realizzato tramite una resistenza da 4 kΩ. La tensione di uscita varia fra 0 e la tensione di riferimento interna V_{ref} (+2,56 V).

La tensione di uscita è data da:

$$V_o = \frac{N}{2^8} \cdot V_{ref} \qquad 16.9$$

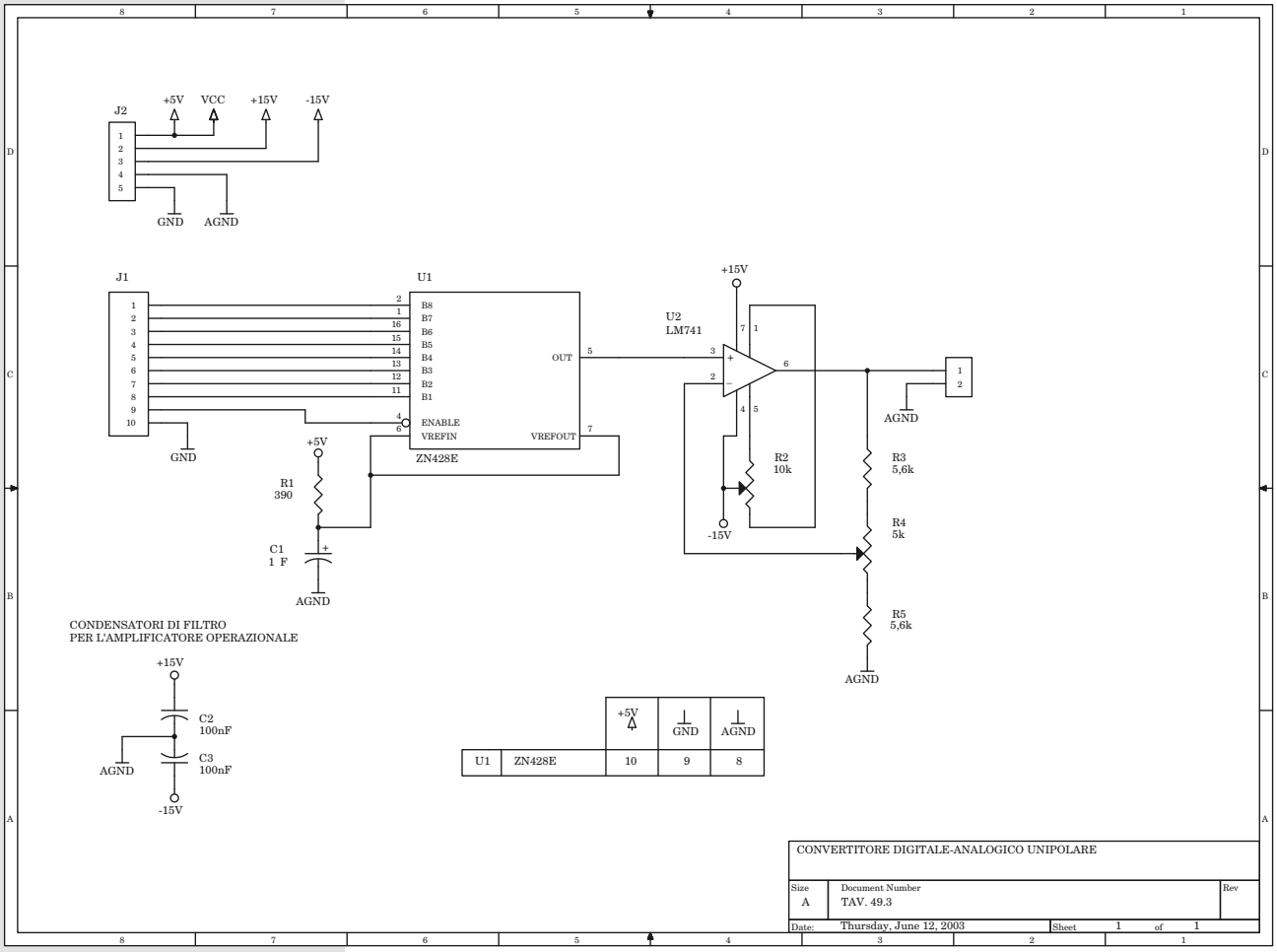
dove:

N è il byte (0 ÷ 255) applicato in ingresso

V_{ref} è la tensione di riferimento compresa fra 0 e +3V

TAVOLA 16.3

Convertitore digitale-analogico unipolare: schema elettrico.



Per funzionare, il generatore di riferimento interno da 2,56 V richiede una resistenza esterna connessa tra il pin 7 e la tensione di alimentazione (+ 5 V) da 390 Ω.

Il D-latch posto nello stadio di ingresso è trasparente quando il segnale enable è al livello logico basso per almeno 100 ns. Il tempo di assestamento del convertitore è di 800 ns.

L'amplificazione del segnale di uscita, necessaria per ottenere un differente campo di variazione per la tensione di uscita, può essere ottenuta realizzando un amplificatore non invertente con un amplificatore operazionale. La scelta delle due resistenze dell'amplificatore dev'essere tale che il loro parallelo sia pari ai 4 kΩ della resistenza R-$2R$ del convertitore: ciò per minimizzare l'effetto delle correnti di polarizzazione dell'amplificatore operazionale. Quando l'ingresso di enable dello stadio di memorizzazione si trova al livello logico alto, l'uscita analogica si mantiene all'ultimo valore convertito.

La ***tabella 16.2*** fornisce l'elenco dei componenti del convertitore D/A. Anche in questo caso il circuito è formato da due parti, una digitale e una analogica; si deve quindi fare attenzione al percorso dei collegamenti di massa, che vanno mantenuti separati per evitare che le due parti si influenzino.

ZN428E-8
ZN428J-8

8-bit latched input monolithic D-A converter

- Single +5V supply
- Microprocessor compatible
- TTL and 5V CMOS compatible
- 800ns settling time
- Complementary to ZN427 A to D Series

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply voltage V_{CC}	+7.0V
Max. voltage, logic and V_{REF} input	$+V_{CC}$
Operating temperature range	0 to +70°C (ZN428E-8) −55 to +125°C (ZN428J-8)
Storage temperature range	−55 to +125°C
Analogue ground to digital ground	±200mV

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = +5V, T_{amb} = 25°C unless otherwise specified)

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Internal voltage Reference					
Output voltage	2.475	2.550	2.625	V	R_{REF} = 390Ω, C_{REF} = 1μF
Slope resistance		0.5	2	Ω	
$V_{REF\ OUT}$ T.C.		50		ppm/°C	
Reference current	4		15	mA	Note 1
D-A converter					
Linearity error			±0.5	LSB	2.0V ≤ $V_{REF\ IN}$ ≤ 3.0V
Differential non-linearity		±0.5		LSB	
Linearity error T.C.		±3		ppm/°C	
Differential non-linearity T.C.		±6		ppm/°C	
Offset voltage		2	5	mV	All bits OFF
Offset voltage T.C.		±6		μV/°C	
Full scale output	2.545	2.550	2.555		External reference $V_{REF\ IN}$ = 2.560V, all bits ON
Full scale output T.C.		2		ppm/°C	
Analogue output resistance		4		kΩ	
External reference voltage	0		3.0	V	
Settling time to 0.5 LSB		800		ns	1 LSB major transition
		1.25		μs	Note 2 All bits ON to OFF or OFF to ON Note 2
Operating temperature range: ZN428E-8 ZN428J-8	 0 −55		 70 125	 C C	
Supply voltage (V_{CC})	4.5	5.0	5.5	V	

Note 1 See REFERENCE, page 1-30.
Note 2 R_L = 10MΩ, C_L = 10pF.

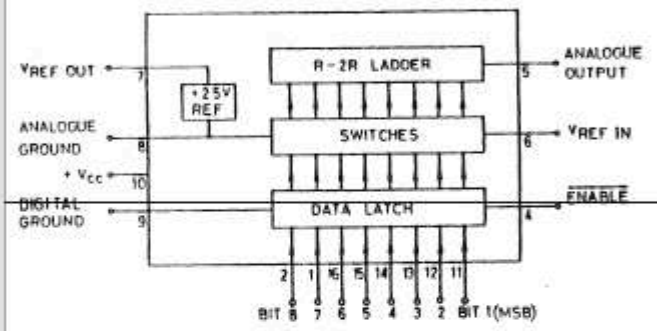


Fig. 16.21
Convertitore D/A ZN428E-8 (*fonte*: Ferranti Semiconductors).

Tabella 16.2 Convertitore D/A unipolare: elenco dei componenti della scheda a circuito stampato

N.	SIGLA	DESCRIZIONE			
1	C1	condensatore	1 μF	10 V	elettrolitico
1	C2	condensatore	100 nF	100 V	ceramico
1	J1	connettore	a 10 poli a innesto		
1	J2	connettore	a 5 poli a innesto		
1	J3	connettore	a 2 poli a innesto		
1	R1	resistenza	390 Ω	1/4 W	5% a strato
1	R2	trimmer	10 kΩ	lineare, multigiri	
2	R3, R5	resistenza	5,6 kΩ	1/4 W	5% a strato
1	R4	trimmer	5 kW	lineare, multigiri	
1	U1	IC LIN	ZN428E	convertitore DAC	
1	U2	IC LIN	LM741	amplificatore operazionale	

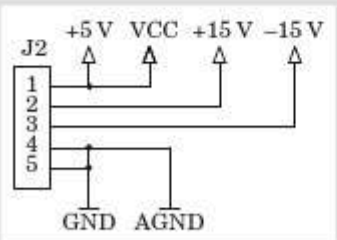


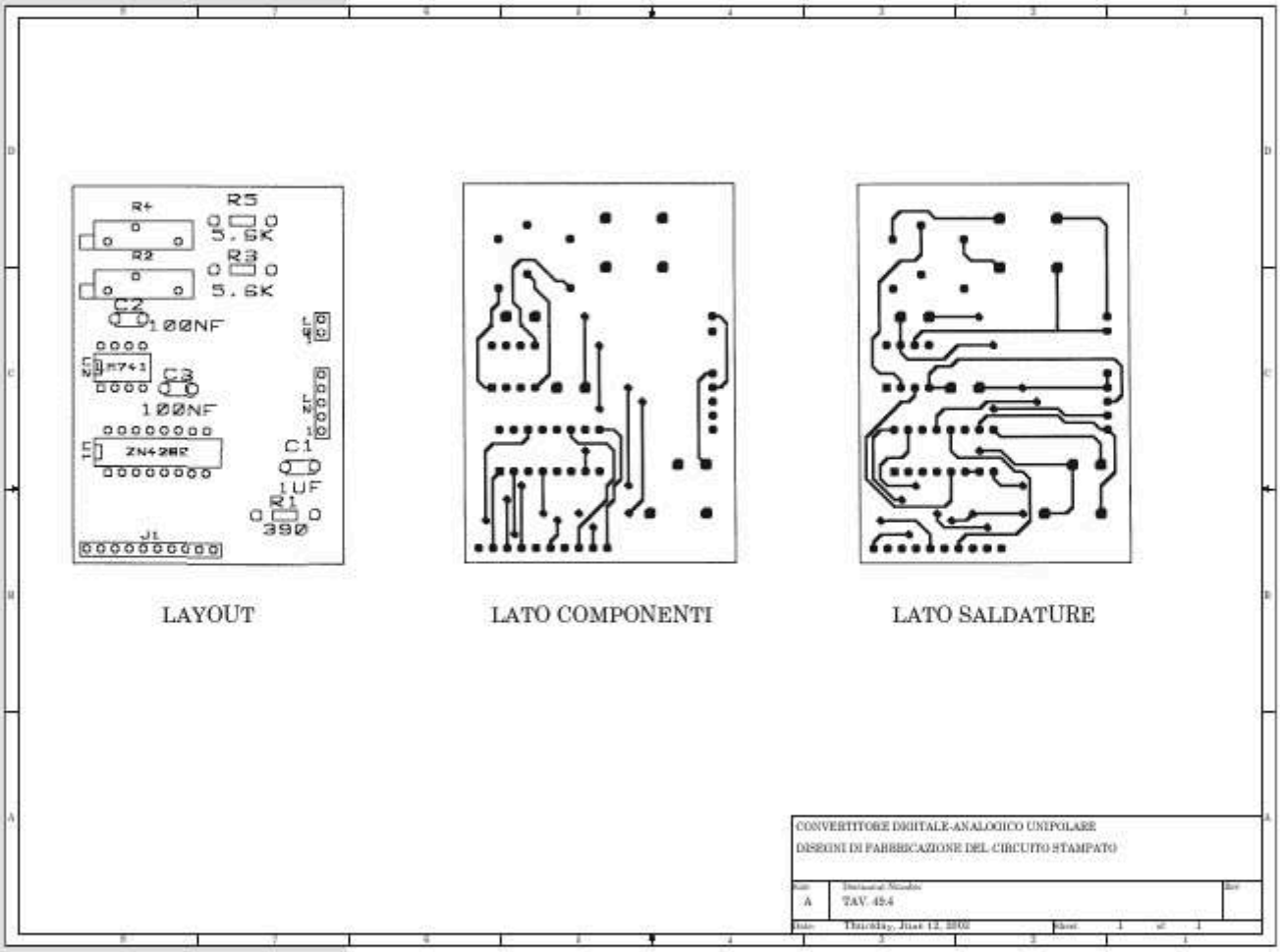
Fig. 16.22
Modifica delle connessioni di massa necessarie per forzare il programma CAD a seguire percorsi di connessione separati.

Come nel caso precedente, l'informazione viene inserita nello schema elettrico utilizzando due diverse sigle di identificazione dei segnali di massa; nella tavola si è usata la sigla GND per la massa digitale e AGND per la massa analogica, scollegando i due percorsi come mostrato nella ***figura 16.22***. La sequenza di realizzazione del disegno è la seguente.

1. Programma OrCAD/STD: attribuzione della sigla di identificazione dei moduli a ciascun dispositivo con il programma FLDSTUFF, oppure mediante editazione del disegno; realizzazione della lista dei collegamenti (*netlist*) in formato OrCAD.PCB.
2. Programma OrCAD/PCB: definizione dei bordi del circuito stampato, caricamento e compilazione della netlist, posizionamento dei componenti sulla scheda, sbrogliatura e ottimizzazione dei collegamenti, correzione del collegamento di massa.

TAVOLA 16.4
Convertitore digitale-analogico unipolare: disegni di fabbricazione del circuito stampato.

La ***tavola 16.4*** mostra i disegni di fabbricazione del circuito stampato dello strumento.



Taratura del convertitore

Il convertitore digitale-analogico unipolare necessita di due operazioni di taratura:

— una di zero;
— una di fondo scala.

La taratura di zero viene eseguita effettuando le seguenti operazioni:

— si mettono le 8 linee del port di uscita dell'elaboratore (DB0 ÷ 7) al livello logico basso (0);
— si memorizza questo dato nel registro interno abilitando la linea di enable (pin 4 dello ZN428E) mediante la generazione di una transizione negativa con il segnale di uscita dell'elaboratore sulla linea denominata enable (pin 9 del connettore J1);
— si ruota il cursore del potenziometro da 10 kΩ, posto fra gli ingressi di offset dell'amplificatore operazionale, finché la tensione di uscita si annulla.

L'operazione di taratura del valore di fondo scala viene eseguita effettuando le seguenti operazioni:
— si scrive sulle 8 linee del port di uscita dell'elaboratore DB0 ÷ 7 otto livelli logici alti (1) (valore massimo);
— si memorizza questo dato nel registro interno abilitando la linea di Enable del microcircuito mediante generazione di una transizione negativa con il segnale di uscita dell'elaboratore enable;
— si ruota il cursore del potenziometro da 5 kW posto fra sul ramo di reazione dell'amplificatore di tensione, finché la tensione di uscita non assume il valore di fondo scala richiesto.

ESERCIZI

2.1 Modifica il circuito che provvede all'azzeramento della tensione di offset utilizzando una configurazione circuitale che mantenga l'escursione della tensione di correzione entro ± 0,6 V.
2.2 Progetta e aggiungi alla tavola un alimentatore in grado di generare le tre tensioni richieste per il funzionamento del circuito: +5 V, +15 V, –15 V.
2.3 Modifica il valore del guadagno dell'amplificatore in modo tale che l'escursione della tensione di uscita sia compresa fra 0 e +10 V.
2.4 Modifica lo schema aggiungendo un ponticello che applichi all'ingresso enable del convertitore un livello logico basso, in modo tale che ogni dato fornito dall'elaboratore venga immediatamente convertito.
2.5 Utilizzando la lista dei collegamenti scaricabile dal sito Internet disegna un nuovo circuito stampato posizionando i dispositivi in modo diverso.

SINTESI DEL MODULO I

CAPITOLO 16

I trasduttori forniscono generalmente in uscita segnali elettrici di tipo analogico, fatto che rende i **processi di conversione** necessari in quasi tutte le applicazioni elettroniche.

— La conversione in una grandezza digitale viene compiuta con la **quantizzazione** del segnale analogico: l'intervallo di variazione del segnale di ingresso viene suddiviso in più porzioni e a ogni porzione viene assegnato un diverso valore binario. Con una serie di letture a intervalli di tempo costanti (**campionamento**) si trasforma poi l'informazione in ingresso in una serie di impulsi di ampiezza variabile. Il segnale che si ottiene è analogico in ampiezza e discreto nel tempo.

— I convertitori commerciali realizzati con le tecnologie dei circuiti integrati sono a 8, 10, 12, 16 bit. La **risoluzione** del convertitore dipende dal numero di bit utilizzati per la conversione: quanti più bit si utilizzano tanto migliore è il **potere risolutivo** del convertitore.

— I **convertitori D/A** convertono l'informazione binaria (in forma parallela o seriale), applicata in ingresso, in una grandezza di tipo analogico (corrente, tensione). Il segnale analogico in uscita è proporzionale al valore numerico della parola binaria applicata in ingresso.

— Un convertitore D/A è formato da un generatore di tensione o corrente di riferimento (*voltage reference*), una rete resistiva (*ladder*), un convertitore corrente-tensione.

— Il **convertitore corrente-tensione** trasforma i livelli di corrente generati dalla rete resistiva in un segnale di tensione. Questo elemento, in genere, non è presente nel microcircuito perché il segnale di uscita tipico dei microcircuiti D/A è una corrente, e quindi l'eventuale conversione corrente-tensione, se necessaria, viene fatta esternamente.

— Il segnale di uscita di un convertitore è affetto da una serie di errori, i più comuni sono l'**errore di offset**, l'**errore di guadagno**, l'**errore di linearità**, l'**errore di non monotonicità**.

— I convertitori D/A vengono utilizzati per produrre: convertitori ad ap-prossimazioni successive; sintesi di forme d'onda; circuiti sample-and-hold; rivelatori di picco; attenuatori e amplificatori programmabili in modo digitale; alimentatori programmabili.

I **convertitori A/D** sfruttano due metodi di conversione: misure di tempo (convertitore a doppia rampa, a trasformazione tensione/frequenza) e il confronto con una grandezza di riferimento variabile (convertitore ad approssimazioni successive).

— I convertitori A/D più usati sono: a gradinata, asserviti, ad approssimazioni successive, a singola rampa, a doppia rampa, a tripla rampa, a quadrupla rampa, paralleli.

I **convertitori tensione/frequenza** (VFC) generano, come segnale di uscita, una serie di impulsi o un'onda quadra, in una forma compatibile con una famiglia micrologica (di solito TTL). La frequenza del segnale di uscita è proporzionale al valore della tensione applicata in ingresso.

— I VFC vengono utilizzati nei voltmetri digitali e nei convertitori analogico-digitali che devono possedere un alto valore di risoluzione. La conversione A/D viene fatta inviando il segnale prodotto dal convertitore tensione/frequenza a un contatore digitale, per un tempo prefissato. La precisione della conversione dipende dal tempo di acquisizione prescelto e dal modulo del contatore.

— I **convertitori frequenza/tensione** (FVC) realizzano un'elaborazione dei segnali opposta a quella effettuata dai convertitori tensione/frequenza: accettano una forma d'onda periodica in ingresso e producono in uscita una tensione proporzionale alla frequenza.

— Gli FVC sono usati principalmente nei controlli di velocità dei motori e nel controllo della frequenza della tensione di rete. Nelle trasmissioni segnale analogico-segnale analogico, il trasmettitore effettua una conversione V/F del segnale da trasmettere (VFC), successivamente l'informazione digitale ottenuta viene trasmessa in modo seriale; nel punto di ricezione, il segnale analogico viene ricostruito dal segnale digitale trasmesso mediante una conversione frequenza/tensione (FVC).

VERIFICHE

1.
Quali sono gli errori caratteristici del processo di conversione A/D?

2.
Con quali metodi si può effettuare una conversione analogico-digitale? Descrivi in modo dettagliato uno dei metodi analizzati nel testo.

3.
I convertitori A/D di tipo Flash presentano l'importante caratteristica di effettuare la conversione molto velocemente. Hanno però alcune limitazioni e di tipo tecnologico. Quali?

4.
Determina la frequenza di campionamento di un segnale audio con frequenza massima di 12 kHz.

5.
Descrivi il funzionamento di un convertitore D/A a rete resistiva tipo R-$2R$.

6.
Quando si rende necessario utilizzare nello stadio di ingresso di un convertitore A/D un circuito sample-and-hold? Quali caratteristiche deve possedere il circuito di sample-and-hold per essere impiegato correttamente?

7.
Quali sono le principali cause di errore di conversione per un ADC? E quali per un DAC?

8.
Per quale motivo si limita la larghezza di banda di un segnale di ingresso applicato all'ingresso di un convertitore A/D? Come si realizza praticamente la limitazione di banda?

9.
Disegna lo schema a blocchi di un sistema di acquisizione dati multicanale.

10.
Definisci le seguenti grandezze che caratterizzano i convertitori A/D: precisione, sensibilità, potere risolutivo, tempo di conversione.

MODULO J

Progettazione delle apparecchiature elettroniche: qualità e limiti di funzionamento

CAP 17

METODI DI PROGETTO

Prerequisiti

- Uso del personal computer.
- Programmazione del personal computer, dei microprocessori e di almeno un microcalcolatore.

Obiettivi

Conoscenze

- Metodiche progettuali delle apparecchiature basate su dispositivi microprogrammabili.
- Valutazione della qualità dei prodotti.
- Concetti di rischio e di sicurezza applicati ai prodotti elettronici.

Competenze

- Saper valutare i limiti meccanici e termici di funzionamento delle apparecchiature elettroniche.
- Saper analizzare un progetto elettronico tenendo conto dei problemi legati all'affidabilità e alla manutenibilità.

CAP 17

Concetti chiave

- Affidabilità del progetto
- Categorie di rischio
- Documentazione tecnica
- Preventivo di spesa
- Valutazione costo-prestazione

METODI DI PROGETTO

1 Limiti meccanici e termici di funzionamento
2 Affidabilità del progetto
3 Collaudo e messa a punto
4 Metodi di realizzazione
5 Documentazione di un'apparecchiatura elettronica
6 Scelta della categoria di rischio dell'attrezzatura
7 Valutazione dei costi e determinazione del prezzo di vendita

Un'apparecchiatura elettronica è un assemblaggio di più dispositivi elettronici, elettromeccanici e meccanici che, in presenza di un certo stimolo in ingresso, di tipo meccanico o elettrico, producono in uscita una reazione desiderata, sempre di tipo meccanico o elettrico. Il progettista, basandosi sulla sua conoscenza e comprensione delle variabili fisiche o elettriche presenti in ingresso e in uscita, sceglie i componenti e la configurazione circuitale che permettono di ottenere le prestazioni desiderate. Ma il suo compito non si esaurisce con il dimensionamento dei vari componenti che compaiono nel circuito: egli deve anche tenere conto di altri fattori che possono condizionare il funzionamento dell'apparecchiatura.

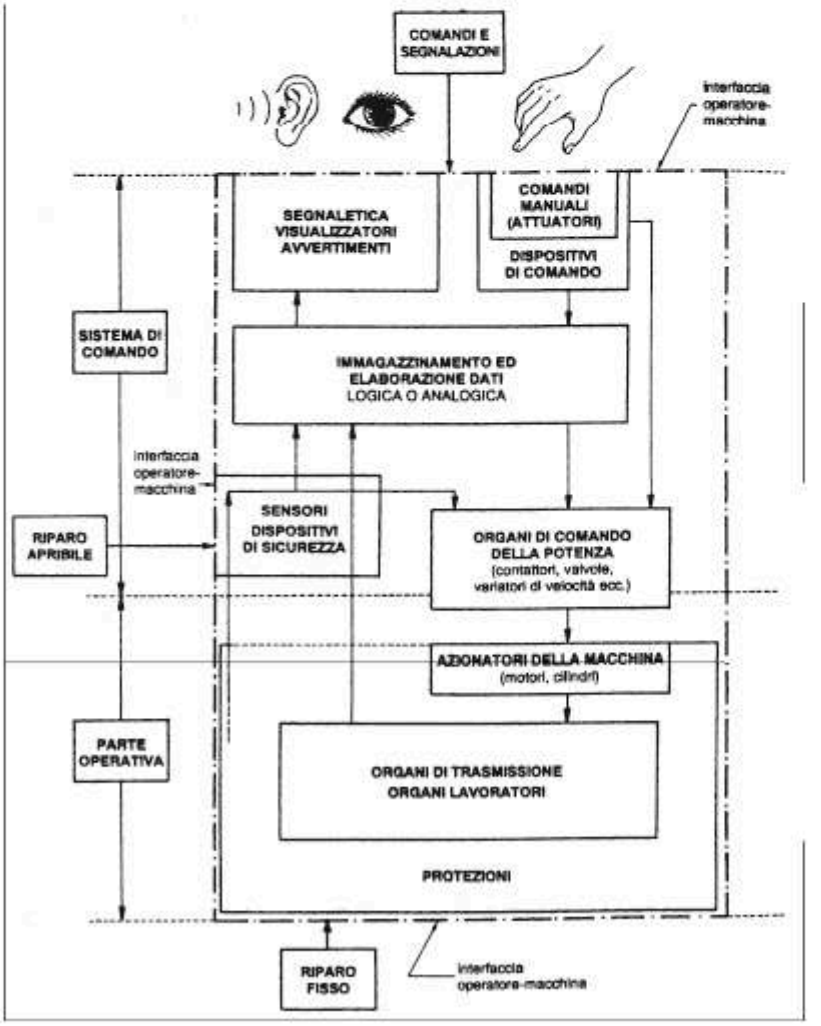


Fig. 17.1
Diagramma a blocchi delle interazioni tra le varie parti di una generica macchina e l'uomo (*fonte*: norma UNI EN 292-1).

Un aspetto importante della progettazione elettronica è l'analisi preventiva dei fattori di rischio finalizzata a evitare l'insorgere di errori di progetto che provocherebbero costosi interventi di modifica. La ***figura 17.1***, tratta dalle norme UNI EN 292-1 (1992), mostra uno schema a blocchi che evidenzia le interazioni fra le varie parti di una generica macchina e l'uomo.

L'individuazione del **grado di protezione IP** minimo che il contenitore dell'apparecchiatura deve possedere per garantire l'adeguata protezione dalla polvere e dall'infiltrazione dell'acqua è di fondamentale importanza, per cui la scelta dev'essere fatta tenendo conto delle condizioni ambientali in cui l'apparecchiatura opererà (▸ ***Vol. 1, Mod. C, Cap. 8***, scaricabile dal sito Internet). Un insufficiente grado di protezione può generare indeterminatezza del contatto elettrico nei commutatori elettromeccanici (connettori, interruttori ecc.), formare contatti accidentali tra circuiti di norma separati, provocare cortocircuiti (*bypass*) tra i contatti del circuito di sicurezza che impediranno l'espletamento della funzione di protezione.

1 LIMITI MECCANICI E TERMICI DI FUNZIONAMENTO

Quando si definiscono le specifiche di progetto non ci si deve limitare a fissare i parametri elettrici delle grandezze di ingresso e di uscita: è necessario precisare anche i limiti di impiego di tipo termico e meccanico.

I **limiti termici** condizionano in modo determinante la scelta del dispositivo elettronico. Abbiamo già detto (▸ ***Mod. E, Cap. 8***) che uno stesso dispositivo viene realizzato con diversi accorgimenti costruttivi (contenitori di tipo ceramico o plastico) perché possa operare in differenti campi di variazione della temperatura. Un progetto che richieda all'apparecchiatura un corretto funzionamento in presenza di forti escursioni termiche necessita di accorgimenti costruttivi e di materiali (sia elettromeccanici sia elettronici) molto costosi, e occorre fissare questa specifica di progetto con molta attenzione.

I **limiti meccanici** coinvolgono il metodo costruttivo utilizzato. In alcuni campi applicativi, quali l'avionica, le apparecchiature elettroniche sono sottoposte, come l'intera struttura dell'aviogetto, a brusche accelerazioni, per cui il contenitore, i metodi di montaggio, l'intero cablaggio dell'apparecchiatura dovranno essere realizzati con cura, affinché il funzionamento sia, comunque, sempre garantito. La presenza di vibrazioni è accettabile solo se se ne è tenuto conto in sede di progetto, dotando l'apparecchiatura di morsetti antiallentamento, prevedendo l'impiego di componenti di massa modesta e, se necessario, dotati di fili di guardia che li vincolino strettamente alla piastra del circuito stampato. Le saldature dei componenti alle piazzole di un circuito stampato possono essere danneggiate dalle vibrazioni causando il non funzionamento o un funzionamento anomalo.

Le specifiche relative al funzionamento, al modo di impiego e all'ambiente (umidità, pressione) in cui verrà utilizzata l'apparecchiatura devono essere chiaramente individuate durante l'analisi preliminare. Le scelte progettuali vanno compiute attribuendo a tutte le fasi di progetto la stessa attenzione: se è importante la scelta dei componenti o della configurazione circuitale da utilizzare, altrettanto importante è la

scelta della tecnica di costruzione, del tipo e della forma del contenitore, e del metodo di cablaggio da utilizzare per l'interconnessione dei vari componenti.

Molto spesso, nella definizione delle specifiche di progetto, si fa riferimento alle *condizioni normali di impiego per apparecchiature elettriche ed elettroniche*; con questa frase si vuole stabilire che l'apparecchiatura sarà progettata conformemente a quanto prescritto dalla norma IEC 947-1 (equivalente alla norma europea EN 60947-1), che fissa le regole generali per le apparecchiature elettriche ed elettroniche. La ***figura 17.2*** presenta i valori e le definizioni più significative.

Fig. 17.2
Condizioni normali di impiego per apparecchiature elettriche ed elettroniche (norme IEC 947-1, EN 60947-1).

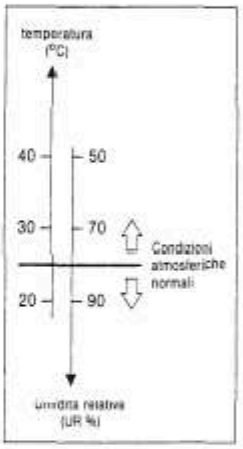
Le sotto elencate condizioni normali di impiego sono valide in generale per apparecchi funzionanti nei limiti di tensione fino a 1.000 V in corrente alternata o 1.500 V in corrente continua, se non diversamente richiesto dalle specifiche norme di prodotto.
I valori e le definizioni sotto riportati sono ripresi dalla norma IEC 947-1 equivalente alla norma europea EN 60947-1 «Regole generali per apparecchiature elettriche di bassa tensione».

Temperatura ambiente
Massima temperatura +40° C
con temperatura media nelle 24 ore non superiore a +35° C;
limite inferiore di temperatura: −5° C.

Altezza
Fino a 2.000 m.

Condizioni atmosferiche

Umidità
Umidità relativa non superiore al 50% con temperatura di +40° C;
umidità relative superiori sono ammesse a temperature inferiori, per esempio 90% a +20° C.



Grado di polluzione dell'ambiente
Per gli apparecchi elettrici ed elettronici si considerano i seguenti gradi di polluzione:

grado 1: non c'è polluzione o si può avere polluzione secca non conduttrice;

grado 2: normalmente gli apparecchi possono essere usati in presenza di sostanze inquinanti non conduttrici; occasionalmente, si può prevedere conduttività temporanea a causa di condensazione;

grado 3: presenza di polluzione conduttrice o di polluzione secca non conduttrice che diventa conduttrice a causa di condensazione;

grado 4: la polluzione provoca conducibilità persistente ed elevata; tale polluzione è causata per esempio da polveri conduttrici, da pioggia o da neve.

Il grado di polluzione normale è:
per le applicazioni di tipo industriale: 3;
per le apparecchiature domestiche e similari: 2.

Il grado di polluzione è il numero convenzionale basato sulla quantità di polvere conduttiva o igroscopica, di gas ionizzato o di sali; sull'umidità relativa e sulla frequenza che produce assorbimento o condensazione di umidità, fenomeno che comporta la riduzione della rigidità dielettrica e/o della resistività superficiale. Il grado di polluzione qui considerato è quello dell'ambiente che circonda le distanze in aria e superficiali fra parti a diverso potenziale.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Che cos'è un'apparecchiatura elettronica?
2. Le variazioni della temperatura influenzano un'apparecchiatura elettronica? Come?
3. Che cosa vuol dire "condizioni normali di impiego per apparecchiature elettriche ed elettroniche"?
4. Da che cosa dipende l'affidabilità di un'apparecchiatura?

2 AFFIDABILITÀ DEL PROGETTO

Un'apparecchiatura elettronica, una volta realizzata, deve garantire un corretto funzionamento nel campo di variazione dei parametri fisici ed elettrici previsti dalle specifiche del progetto. L'eventuale disservizio di un

Fig. 17.3
Dissipatore di calore.

componente a basso costo non deve comportare il blocco o il degrado delle funzioni dell'apparecchiatura, danneggiando i dispositivi comandati in uscita o bloccando il funzionamento di un'apparecchiatura molto costosa o di particolare importanza per l'impianto in cui è inserita.
L'affidabilità di un'apparecchiatura dipende da quella di ogni singolo componente utilizzato nella sua realizzazione e dalle tecniche di cablaggio adoperate. Per esempio, fra i vari sistemi di montaggio e di connessione è sempre consigliabile utilizzare quelli che offrono garanzie di ripetitività e precisione. Ogni componente elettronico è caratterizzato da valori massimi di alcuni parametri elettrici (tensioni, correnti, potenza) che non devono essere superati per evitare che il componente si danneggi. Ricordiamo che la potenza massima dissipabile rappresenta il valore di potenza che il dispositivo può dissipare sotto forma di calore senza danneggiarsi.

Talvolta il dispositivo richiede l'adozione di particolari metodi di montaggio o l'utilizzo di appositi dispersori di calore che eliminino il calore per conduzione, convezione o irraggiamento (▸ ***Fig. 17.3***).

Per la scelta del dispositivo è utile adottare un criterio basato su un **coefficiente di sicurezza** abbastanza ampio; in tal modo si evita che il componente venga utilizzato in condizioni di funzionamento al limite delle sue possibilità. Molti parametri indicati dai costruttori nei fogli tecnici di documentazione dei dispositivi elettronici sono basati su valori statistici per cui, durante la fase di progettazione, occorre effettuare il dimensionamento dei componenti adottando nei calcoli coefficienti di sicurezza molto ampi. Per esempio, per le resistenze è utile impiegare resistori capaci di dissipare una potenza pari a una volta e mezza quella calcolata. Il valore del coefficiente di sicurezza adottato influenza, ovviamente, in modo sensibile, il costo globale dell'apparecchiatura.

Un progetto di qualità deve sempre tener conto anche delle esigenze di manutenibilità dell'apparecchiatura elettronica. Eventuali segnalazioni importanti sullo stato degli ingressi o delle uscite devono prevedere messaggi ridondanti; per esempio, la segnalazione delle condizioni in cui si trova un'uscita che pilota il motore di un ventilatore dovrebbe impiegare due segnalazioni: una che segnala lo stato di *ventilatore in marcia* e una quello di *ventilatore fermo*. In questo modo, se entrambe le segnalazioni fossero spente significherebbe che una delle due è senz'altro inefficiente e va sostituita.

Le caratteristiche di alimentazione (tensione, corrente, potenza assorbita) di un'apparecchiatura alimentata con tensione di rete devono essere conformi a quella fornita dall'ente erogatore. Quando la tensione di rete, per una qualsiasi causa, viene a mancare, o viene riapplicata a un'apparecchiatura elettronica di controllo di una macchinario elettrico (motori, elettrovalvole, organi di attuazione pneumatici ecc.), quest'ultimo *non deve mettersi in moto* ma assumere lo stato di non operatività (**messa in sicurezza**).

Stabilità

Se si vuole che le caratteristiche di un circuito non cambino nel tempo occorre utilizzare componenti elettronici con proprietà elettriche stabili. Per alcune apparecchiature, per esempio nelle applicazioni per l'avionica, questa caratteristica è irrinunciabile, e quindi i componenti elettronici vanno sottoposti, prima del montaggio, a un processo di invecchiamento controllato.

Collegamento di massa

In quasi tutti i progetti occorre creare un percorso a bassa impedenza tra il potenziale di riferimento interno del circuito elettronico (**massa**) e il telaio del contenitore dell'apparecchiatura; quando l'apparecchiatura viene installata, il telaio, per soddisfare le norme di sicurezza, deve sempre essere collegato a terra.

Tutti i conduttori, i componenti elettronici, il telaio presentano una capacità verso terra che si carica con una tensione che dipende dai campi elettrici di rumore generati dal campo elettrico terrestre o dalla presenza nelle vicinanze di altre apparecchiature o conduttori metallici. Il valore di queste capacità dipende dalle dimensioni e dalla disposizione del circuito elettronico rispetto ai conduttori, alle pareti del contenitore e all'ambiente che circonda l'apparecchiatura. Un modo per ridurre l'effetto di queste capacità è racchiuderla, per intero o in parte, in una gabbia metallica (**schermo**) che deve poi essere connessa in modo efficiente, cioè con un percorso a bassa resistenza, con la massa dell'apparecchiatura.

Impedenza dei collegamenti di massa

L'impedenza dei collegamenti di massa dev'essere sempre molto bassa. Per ottenere questo risultato è necessario utilizzare cavi o piste di grande sezione ed è inoltre utile far circolare le correnti di basso valore su percorsi separati da quelli utilizzati per le altre correnti. Queste ultime, infatti, anche in presenza di un basso valore resistivo, generano cadute di tensione significative.

Nei circuiti digitali la separazione delle linee di segnale da quelle di potenza è indispensabile in quanto una caduta di tensione significativa sulla linea di alimentazione, o su quella del riferimento di massa, provoca un'alterazione dei livelli logici che determina il malfunzionamento del circuito digitale e, di conseguenza, di tutta l'apparecchiatura elettronica.

3 COLLAUDO E MESSA A PUNTO

Il progettista di un'apparecchiatura elettronica costruisce una serie di circuiti che gli permettono di effettuare un'attenta valutazione e verifica del funzionamento statico e dinamico di tutte le parti che la compongono.

Le prove di collaudo e di messa a punto coinvolgono in genere il modello, il prototipo e il prodotto finito.

Prove sul modello

Terminata la fase di analisi delle specifiche di progetto, e scelti i componenti e la configurazione circuitale più adatti, si realizza un modello dell'apparecchiatura utilizzando una delle tecniche di laboratorio che permettono una rapida realizzazione.

In questa fase si opera una prima valutazione delle prestazioni offerte dai vari componenti, per cui la tecnica di realizzazione prescelta dev'essere tale da permetterne la sostituzione in modo semplice e rapido.

Prove sul prototipo

Una volta che le prove sul modello hanno dimostrato che il circuito adottato è in grado di soddisfare le specifiche del progetto, si realizza un'appa-

recchiatura completa seguendo nella costruzione i criteri che saranno poi utilizzati nella fabbricazione del prodotto finale.
Il prototipo viene quindi fatto funzionare sia in condizioni di impiego normale sia in condizioni limite previste dalle specifiche di progetto. Le prove coinvolgono l'apparecchiatura nel suo insieme e nelle sue parti.

Prove sul prodotto finito

Quelle sul prodotto finito sono prove di qualità effettuate con metodi statistici tendenti in genere a verificare che il comportamento dell'apparecchiatura sia conforme alle specifiche del progetto. Talvolta la prova può essere effettuata installando l'apparecchiatura nell'ambiente e sulle macchine con cui opererà.

La prova che si effettua inserendo l'apparecchiatura nel suo ambiente operativo non è sempre agevole da fare. Per esempio, un'apparecchiatura destinata ad applicazioni spaziali o al controllo di macchine operatrici di costo e di ingombro elevato non può essere provata nelle reali condizioni di impiego; in questi casi è necessario progettare e costruire apposite apparecchiature di simulazione oppure, sfruttando sofisticati algoritmi matematici, elaborare un modello matematico dell'apparecchiatura in prova e, mediante un calcolatore, eseguire una completa simulazione delle diverse condizioni operative.

Prove sulle applicazioni militari

Le apparecchiature elettroniche per applicazioni militari richiedono prove accurate da parte dell'ente committente, sia in fase di accettazione sia in fase di installazione. Queste prove, che coinvolgono l'apparecchiatura nel suo insieme e le sue diverse parti (componenti elettronici ed elettromeccanici, involucro) sono molto onerose e incidono significativamente sul costo complessivo dell'apparato.

Le apparecchiature per usi militari richiedono l'utilizzo di componenti che soddisfino normative molto rigide riguardanti sia i componenti sia le modalità di collaudo; inoltre, le caratteristiche di sicurezza e di affidabilità devono essere tali da garantire un tempo medio di vita dell'apparecchiatura molto elevato.

Prove della reazione al fuoco

Un'apparecchiatura elettrica ed elettronica possiede caratteristiche che, oltre a garantirne il funzionamento in condizioni normali, ne impediscono la trasformazione, in caso di incendio o di surriscaldamento, in un fattore di propagazione delle fiamme e di emissione di fumi tossici.

Le norme prevedono una serie di prove, che coinvolgono sia l'apparecchiatura sia i materiali, per valutarne la reazione e quindi assegnare le certificazioni dell'impiego in sicurezza.

Le prove previste dai diversi enti, nazionali e internazionali, per i materiali e le apparecchiature elettriche, sono indicate nella ***figura 17.4***.

Ricerca del guasto

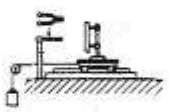
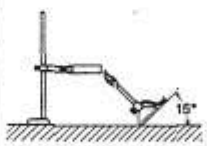
In fase di progetto si definiscono il metodo di cablaggio dei componenti e la loro disposizione sulle schede in modo tale da rendere possibile effettuare le necessarie operazioni di calibrazione e di misura nel modo più semplice e rapido. Nelle applicazioni industriali l'apparecchiatura viene

in genere realizzata suddividendo il circuito elettronico in più unità funzionali cablate su moduli separati, interconnessi per mezzo di una scheda o di un cablaggio eseguito con cavi elettrici. Questa tecnica permette di sostituire l'unità funzionale difettosa minimizzando il tempo di fermata della macchina o dell'apparecchiatura controllata.

La riparazione della scheda difettosa viene successivamente effettuata in un laboratorio appositamente attrezzato. Ogni scheda va progettata in modo tale che i componenti siano facilmente rimovibili e sostituibili, e che tutte le connessioni significative del circuito siano provviste di adeguati punti di misura.

Ogni qualvolta possibile, nelle apparecchiature elettroniche vengono utilizzati microcircuiti a media e a larga scala di integrazione, dato che il progetto, il collaudo e la ricerca dei guasti in apparecchiature a microcircuiti sono in genere più semplici e affidabili che in apparecchiature contenenti molti componenti discreti. Dobbiamo però ricordare che non sempre la ricerca dei guasti e la relativa riparazione sono convenienti: talvolta il basso costo dell'apparecchiatura, confrontato con l'investimento (in attrezzature e in personale) richiesto dalla riparazione, li rende svantaggiosi in termini economici.

Fig. 17.4
Reazione al fuoco dei materiali e delle apparecchiature.

TIPO DI PROVA	APPARECCHIATURA DI PROVA	RISPONDENZA NORMATIVA	SCOPO DELLA PROVA	RISULTATO DELLA PROVA	CONDIZIONI DI PROVA		
					sorgente di calore	durata della prova	elementi caratteristici
FILO INCANDESCENTE (GLOW-WIRE TEST)		IEC 695-2-1 CEI 50-11	Verifica che riscaldamenti anormali prodotti da sovraccarichi e cattivi contatti con relativi surriscaldamenti non compromettano la sicurezza del materiale isolante. La prova è d'accensione. Il filo viene premuto contro il provino con una certa forza e penetra all'interno per 7 mm.	L'eventuale manifestazione della fiamma deve cessare entro 30 sec. dalla rimozione del filo incandescente. TEMPERATURE DI PROVA • 650°C per materiali che non sostengono parti in tensione. • 750°C per materiali che sostengono parti in tensione di prese mobili e spine. • 850°C per materiali che sostengono parti in tensione di prese fisse e interruttori.	Filo incandescente di 4 mm di diametro	Filo applicato per 30 secondi	Tempo di spegnimento della fiamma
UL (UNDERWRITERS' LABORATORIES)		UL 94	Misurazione del tempo in cui può continuare a bruciare un provino campione quando viene rimossa la fiamma diretta.	• V0 se il provino brucia per meno di 5 sec. prima di autoestinguersi. • V1 se brucia per meno di 25 sec. • V2 se brucia per meno di 25 sec. con gocciolature incandescenti. • HB se brucia per un tempo maggiore di 25 sec. (provino orizzontale e velocità di bruciatura inferiore a 38 mm al minuto). Assimilabile a ASTM D-635	Fiamma a Becco Bunsen	Fiamma applicata per 10 secondi e per due volte consecutive	Durata della combustione
ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS)		ASTM D-635	Misurazione del tempo e della velocità con cui il provino campione brucia dopo la rimozione della fiamma diretta.	• Ininfiammabile se il provino non brucia. • Autoestinguente se brucia per una lunghezza inferiore a 100 mm	Fiamma a Becco Bunsen	Fiamma applicata per 30 secondi e per due volte consecutive	Lunghezza bruciata del provino

PER FISSARE I CONCETTI

1. Che scopo ha la messa a terra delle apparecchiature elettroniche e quali caratteristiche deve avere?
2. Descrivi le principali prove di collaudo e di messa a punto effettuate sulle apparecchiature elettroniche.
3. La manutenibilità di un'apparecchiatura elettronica, intesa come ricerca del guasto, influenza il progetto fin dalle sue fasi iniziali. In che modo?

4 METODI DI REALIZZAZIONE

I cavi da impiegare nelle apparecchiature elettroniche devono avere rivestimenti plastici del tipo ignifugo (**autoestinguente**). Questa specifica è imposta da vari enti di normazione perché il funzionamento anomalo di una parte dell'apparecchiatura può comportare, localmente, lo sviluppo di una forte dissipazione di potenza, e quindi di calore: è dunque necessario prevenire la possibilità che (in un ambiente favorevole) si inneschi un incendio suscettibile di danneggiare permanentemente l'apparecchiatura o le attrezzature che la circondano. I cavi con caratteristica ignifuga, se soggetti a eccessiva temperatura o al fuoco, generano una quantità minima di fumi tossici e sostanze corrosive.

Il cablaggio dei cavi in un'apparecchiatura dev'essere ordinato, privo di morsetti o giunzioni volanti e tale (nel caso di tensioni superiori ai 50 V) da escludere la possibilità che l'utente o il manutentore vengano a contatto con parti in tensione; i cavi devono essere colorati nel modo indicato dalle norme.

Gli organi di interfaccia uomo-macchina (comandi e segnalazioni) devono essere funzionali, funzionanti e interpretabili senza possibilità di errore. Un pulsante di avviamento o inserzione dev'essere provvisto di una ghiera che ne impedisca l'azionamento accidentale, mentre quelli di arresto o di disinserzione non devono averla ma devono offrire la massima affidabilità possibile: dal loro tempestivo azionamento dipende infatti la messa in sicurezza della macchina controllata. Un pulsante di arresto non deve mai essere escludibile dal circuito di controllo.

Ogni macchina deve aver un modo di arresto in **categoria zero** che sospenda immediatamente l'erogazione della tensione di alimentazione a tutti gli attuatori presenti su di essa. I commutatori non vanno posizionati né troppo in alto (≤ 1,7 m) né troppo basso (≥ 0,6 m) per non far assumere all'operatore posizioni scomode e instabili.

I pulsanti di arresto e disinserzione possono essere a fungo (palmare), a pedale, a fune, a maniglia o a leva. Il **pulsante a fungo** (▸ ***Fig. 17.5***), grazie alla sua forma, può essere azionato con una qualsiasi parte del corpo e quindi garantisce, in qualsiasi circostanza, la sua pronta attivazione.

Fig. 17.5
Pulsanti impiegati nelle apparecchiature industriali.

L'efficienza di una lampada di segnalazione dev'essere verificabile mediante pulsanti di prova e il suo colore dev'essere conforme alla codificazione cromatica internazionale (▸ ***Tab. 17.1***).

Tabella 17.1 Codice cromatico internazionale per pulsanti di comando e lampade di segnalazione

PULSANTI DI COMANDO

TIPO DI PULSANTE	COLORE
Avviamento	Bianco Grigio Nero
Arresto	Nero Grigio Bianco
Arresto di emergenza	Rosso
Funzionamento a pressione mantenuta	Bianco Grigio Nero
Attivazione in normali condizioni di sicurezza	Verde
Attivazione stati di attenzione e segnali di allarme	Giallo
Ripristino di relè	Blu Bianco Grigio Nero
Ripristino con arresto Ripristino con disinserzione	Nero Bianco Grigio

SEGNALATORI LUMINOSI

SITUAZIONE	COLORE	AZIONE RICHIESTA
Emergenza dovuta a condizioni di pericolo	Rosso	intervento immediato per ovviare alla situazione di pericolo
Allarme per condizioni anormali Verifica della situazione anomala	Giallo	intervento di controllo
Conferma di situazioni normali Eventuale autorizzazione a procedere	Verde	acquisizione dell'informazione
Condizione che richiede un'azione obbligatoria	Blu	messa in atto obbligatoria dell'azione richiesta
Segnalazione generica	Bianco	acquisizione dell'informazione

Dissipazione del calore

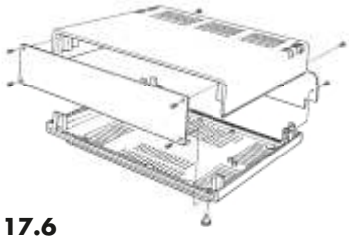
Il problema della dissipazione di calore in un'apparecchiatura elettronica riveste una particolare importanza: la scelta o il dimensionamento del contenitore devono essere compiuti valutando il volume d'aria che esso racchiuderà e il modo in cui il calore prodotto dall'apparecchiatura sarà eliminato. Tale analisi ha lo scopo di evitare che gli apparati elettronici

racchiusi in un contenitore offrano prestazioni inferiori a quelle richieste, o addirittura non funzionino affatto a causa dell'aumento della temperatura dovuto al calore sviluppato durante il normale funzionamento o provocato da fattori ambientali.

Il problema può essere affrontato in vari modi, in funzione della sua gravità:

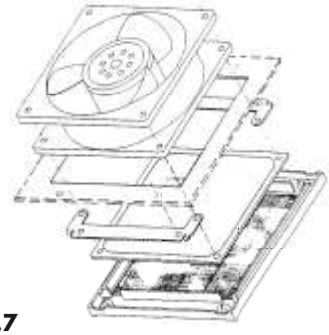
— il modo più semplice è quello di scegliere, per i componenti che dissipano potenza, una posizione e un orientamento sulla scheda e nel contenitore che favoriscano il rapido smaltimento del calore prodotto;
— il secondo modo riguarda l'impiego di contenitori provvisti di fori di aerazione disposti in modo tale che l'aria, per convezione, venga scambiata con l'ambiente circostante il più rapidamente possibile (▸ ***Fig. 17.6***);
— il terzo modo è quello che prevede l'installazione nell'apparecchiatura di ventilatori aspiranti o soffianti (▸ ***Fig. 17.7***); questi componenti elettromeccanici sono costosi, hanno bisogno di interventi di manutenzione e, soprattutto, richiedono che l'installazione dell'apparecchiatura elettronica che li impiega sia eseguita in modo accurato; per evitare che l'efficienza del ventilatore sia compromessa è necessario che il posto in cui l'apparecchiatura viene installata sia sgombro di ostacoli e che nell'ambiente che la circonda non vi siano né residui di lavorazioni né polvere.

Fig. 17.6
Contenitore con aperture di aerazione.



17.6

Fig. 17.7
Ventilatore.



17.7

L'economicità di una realizzazione elettronica viene salvaguardata dall'attenta valutazione delle varie soluzioni tecniche adottabili per risolvere uno specifico problema seguendo il criterio del **rapporto prestazione-costo**. La scelta cade quasi sempre sulla soluzione che offre maggiori garanzie di affidabilità a parità di costi.

Sicuramente importante è l'aspetto estetico della scheda elettronica, del cablaggio e dell'intera apparecchiatura, che dev'essere gradevole e riflettere il gusto e lo stile del progettista. Le scelte stilistiche non devono comunque sacrificare gli aspetti che riguardano la funzionalità e il modo di impiego dell'apparecchiatura, cioè l'accessibilità dei comandi e la visibilità delle segnalazioni.

Metodi di cablaggio

L'assemblaggio di un qualsivoglia sistema elettronico può essere suddiviso nei sei livelli di interconnessione (*packaging*) descritti di seguito.

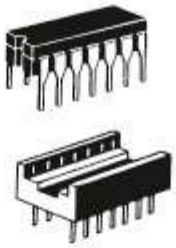
- **Livello 1**: connessione tra l'elemento base di un dispositivo elettronico (lamina di quarzo, chip di un circuito integrato) e i terminali che lo collegano con l'esterno (▸ ***Fig. 17.8***).

- **Livello 2**: connessione tra il terminale di un componente e il circuito stampato, per esempio gli zoccoli per circuiti integrati del tipo DIP o *chip carrier* e per microinterruttori (▸ ***Fig. 17.9***).

Fig. 17.8
Connessione tra l'elemento base di un dispositivo elettronico e i terminali di collegamento con l'esterno.

Fig. 17.9
Connessione zoccolo-circuito integrato.

17.8



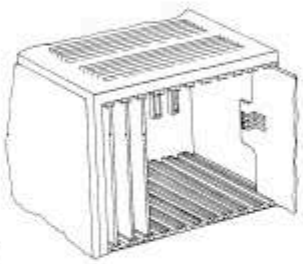
17.9

- **Livello 3**: connessione tra due o più circuiti stampati, per esempio la connessione tra la scheda madre (*mother board*) di un computer e la scheda figlia (▸ ***Fig. 17.10***).

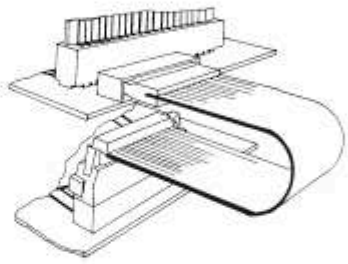
- **Livello 4**: connessioni tra due sottoassiemi, per esempio tra l'unità di alimentazione e un sottoassieme da essa alimentato (▸ ***Fig. 17.11***).

Fig. 17.10
Connessione tra due schede.

Fig. 17.11
Connessione tra due sottoassiemi.



17.10



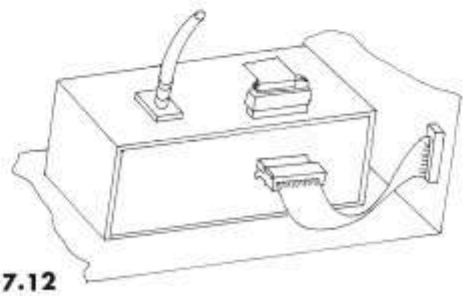
17.11

- **Livello 5**: connessioni da un sottoassieme principale ai connettori di I/O del sistema completo (▸ ***Fig. 17.12***).

- **Livello 6**: connessioni tra sistemi fisicamente separati, per esempio il collegamento tra un computer e una stampante o un'altra apparecchiatura periferica (▸ ***Fig. 17.13***).

Fig. 17.12
Collegamento di un apparato ai connettori di I/O.

Fig. 17.13
Connessione tra sistemi fisicamente separati.



17.12

17.13

Il **livello 1** rappresenta il primo stadio dell'interconnessione; all'interno di tutti i componenti vi sono gli elementi circuitali in cui avvengono le funzioni elettroniche basilari (chip dei circuiti integrati). La connessione di questi elementi a un filo o ai terminali di uscita viene ottenuta, in

molti casi, per compressione diretta o per saldatura, ed è eseguita direttamente dal costruttore. I dispositivi complessi a livello primario incorporano comunemente una struttura di uscita, a cui sono saldati i collegamenti al chip.

Su un circuito stampato la **connessione tra il piedino del componente e una pista** viene effettuata per mezzo di uno zoccolo oppure con la saldatura.

La **connessione da scheda a scheda** viene effettuata con connettori del tipo **card-edge** (in cui il maschio è ricavato direttamente sul circuito stampato) o con connettori per circuito stampato in due pezzi che uniscono due schede all'interno dello stesso sottoassieme.

L'**interconnessione di più sottoassiemi** viene realizzata collegando tra loro dei connettori a saldare posti sul circuito stampato. I collegamenti sono costruiti con cavo ribbon, cavi piatti su film plastico o cordoni di conduttori singoli. Anche i cablaggi per radiofrequenza (cavi coassiali) o quelli effettuati con fibre ottiche sono utilizzabili a questo livello di interconnessione. Una volta cablati e interconnessi, i sottoassiemi vanno collegati con l'esterno con connettori di I/O montati sul telaio o sul retro dell'apparecchio.

Per i **collegamenti tra i connettori** si utilizzano le stesse cavetterie impiegate nell'interconnessione dei sottoassiemi, ma occorre fare molta attenzione alla protezione dagli agenti ambientali, alla schermatura, alla facilità di connessione, alla compatibilità con le interfacce normalizzate e anche all'aspetto estetico.

La **connessione da sistema a sistema**, che ha lo scopo di creare un collegamento fisico, viene generalmente realizzata mediante cavi e connettori. La più comune è costituita da un cavo rotondo, schermato e coperto da una guaina; altre realizzazioni utilizzano cavi per radiofrequenza, cavi ribbon coassiali, collegamenti in fibra ottica e vari tipi di connettore maschio e femmina in grado di soddisfare le esigenze di tipo elettrico, meccanico ed estetico.

I metodi di realizzazione più comuni di un circuito elettronico sono:

— montaggio dei componenti su un supporto isolante e collegamenti elettrici eseguiti con cavi connessi da punto a punto;
— montaggio dei componenti su un supporto isolante e connessioni eseguite con un particolare processo di fabbricazione che permette di ricavare i collegamenti da una superficie conduttiva rivestente il supporto stesso (circuito stampato).

La documentazione necessaria per realizzare un cablaggio con il primo metodo è costituita dallo schema elettrico e dalla lista dei componenti; successivamente si prepara un disegno che mostra come i componenti elettronici vanno posizionati sulla scheda di supporto.

I collegamenti vengono ricavati durante l'esecuzione del cablaggio direttamente dallo schema elettrico oppure da una lista di connessione (*netlist*); quest'ultima elenca tutti i terminali di ogni componente che compare nel circuito elettronico. Accanto a ogni terminale sono indicati le sigle o i numeri di identificazione dei vari componenti con cui dev'essere connesso.

Quando, in fase di studio, si devono realizzare dei circuiti di prova (**prototipi**) si ricorre al **cablaggio manuale**, che può essere eseguito

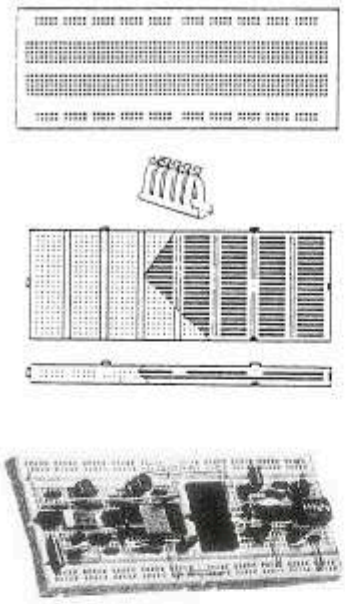


Fig. 17.14
Basetta sperimentale breadboard.

abbastanza velocemente e, se necessario, modificato. Se il cablaggio da eseguire è provvisorio e dev'essere impiegato per prove di laboratorio al fine di valutare la funzionalità di alcune parti di un apparato elettronico, o le caratteristiche di qualche componente o di una particolare configurazione circuitale, si utilizza un tipo particolare di supporto: la **basetta breadboard** (▸ ***Fig. 17.14***).

Questa basetta è provvista di un reticolo di fori disposti con un passo di un decimo di pollice; ogni foro contiene una pinzetta interconnessa con altre pinzette in modo da formare segmenti di cavo. Inserendo i componenti elettronici e utilizzando spezzoni di cavo di lunghezza appropriata è possibile realizzare il circuito elettronico in modo rapido e affidabile senza procedere a saldature, al termine della prova i componenti sono riutilizzabili. A causa delle notevoli capacità e induttanze parassite, le basette breadboard non sono però utilizzabili per realizzare circuiti che operano a frequenze superiori a 1 MHz.

Le connessioni possono essere eseguite con apposite schede commerciali che, per la saldatura dei componenti, hanno le piazzole già forate e disposte sulla scheda distanziate di un decimo di pollice, per permetterne l'utilizzo con i circuiti integrati (▸ ***Fig. 17.15***). I componenti vengono fissati meccanicamente alla scheda con saldature e il collegamento elettrico è realizzato con cavi saldati sulle piazzole.

Recentemente sono state introdotte nuove tecniche di cablaggio che non richiedono l'esecuzione di alcuna saldatura. La più diffusa tecnica di **cablaggio senza saldature**, la **wrap**, si avvale di un tipo di cavo elettrico cablato mediante un particolare attrezzo (▸ ***Fig. 17.16***): le connessioni elettriche sono realizzate semplicemente avvolgendo il cavo sul terminale del componente da connettere (▸ ***Fig. 17.17***).

Fig. 17.15
Piastre di cablaggio manuale dei componenti elettronici.

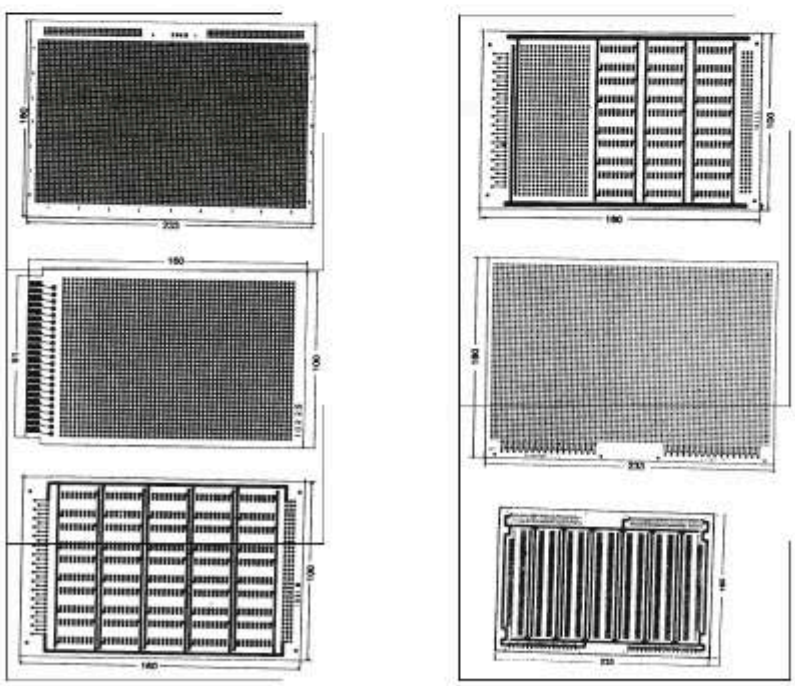
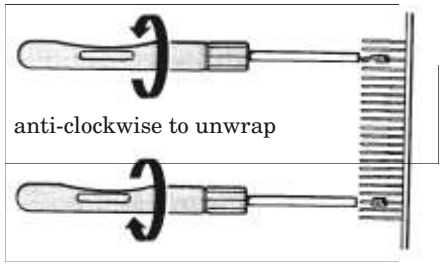
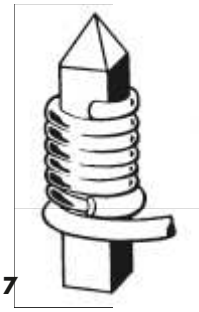


Fig. 17.16
Attrezzatura per wrap.



17.16

Fig. 17.17
Connessione wrap.



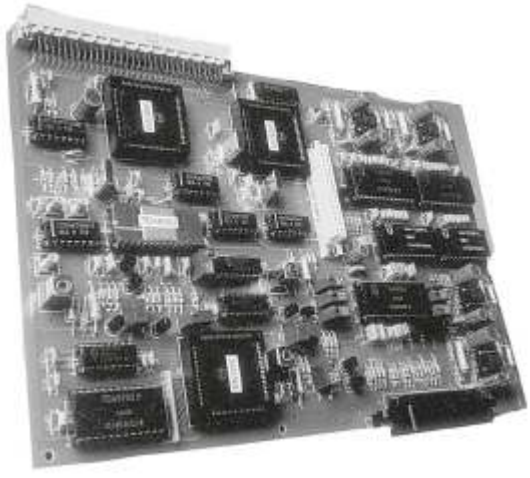
17.17

Fig. 17.18
Attrezzo per wrap alimentato a batteria.

L'attrezzo della ***figura 17.18*** funziona a batteria e permette di velocizzare l'esecuzione delle connessioni.
I componenti elettronici cablati con questa tecnica sono riutilizzabili quando la scheda viene smontata. Tuttavia, poiché è molto difficile costruire due schede o apparecchiature identiche e dotate esattamente delle stesse caratteristiche di affidabilità, la tecnica di realizzazione di un'apparecchiatura cablata è consigliabile solo quando si devono produrre solo pochissime schede o apparecchiature, e se il circuito da eseguire è semplice, utilizza pochi componenti, è facile da collaudare e non verrà modificato in seguito. Qualsiasi intervento successivo risulterà quasi sicuramente di difficile esecuzione perché i vari circuiti non sono perfettamente identici, e la documentazione e la tecnica utilizzate per effettuare le connessioni dipendono essenzialmente dall'abilità del tecnico che ha realizzato il cablaggio.

Il montaggio con il **metodo del circuito stampato** (‣ ***Fig. 17.19***) richiede una documentazione più accurata e completa della tecnica cablata. Oltre allo schema elettrico e alla lista dei componenti, devono essere fornite indicazioni precise su tutte le particolarità costruttive e di montaggio dei vari componenti elettronici ed elettromeccanici utilizzati; i materiali da impiegare vanno scelti con cura e vanno raccolte tutte le informazioni riguardanti le dimensioni fisiche dei componenti e le loro caratteristiche di impiego. Questo metodo costruttivo richiede che il tecnico presti grande attenzione all'analisi preventiva della documentazione

Fig. 17.19
Circuito stampato.



necessaria all'esecuzione dei disegni di fabbricazione del circuito stampato perché, una volta che i disegni sono stati riprodotti e utilizzati nel processo di fabbricazione, non sono più consentiti ripensamenti e correzioni.

L'importanza di questa tecnica di montaggio delle apparecchiature elettroniche è dovuta alle caratteristiche di alta omogeneità delle prestazioni offerte dal prodotto finito. Infatti, una volta ricavato dal disegno di fabbricazione, il tracciato dei conduttori può essere riprodotto in un gran numero di esemplari. I circuiti stampati così ottenuti possiedono caratteristiche dimensionali e qualitative omogenee, e quindi possono essere montati con macchine automatizzate oppure da personale con bassa qualificazione.

Anche la fase di collaudo è avvantaggiata dalle caratteristiche di ripetitività del cablaggio: la regolare e costante disposizione dei componenti sulla scheda a circuito stampato fa sì che le procedure di prova e di controllo siano eseguibili con apposite apparecchiature in modo automatico (ATE).

ATE
– Automatic test equipment

Tecnica di progetto modulare a schede

La tecnica di progetto modulare si basa sulla realizzazione di un'apparecchiatura elettronica suddivisa su più schede, ciascuna delle quali contiene una parte del circuito generale; queste parti sono unità funzionali ben definite dell'apparecchiatura (▸ ***Fig. 17.20***).

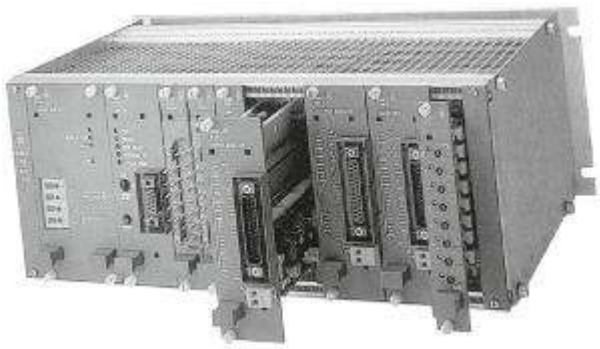


Fig. 17.20
Apparato elettronico realizzato con schede funzionali separate.

Il collegamento tra le varie schede può essere realizzato con tecniche cablate o con circuiti stampati sui quali vengono montati connettori del tipo femmina che accettano i connettori corrispondenti del tipo maschio montati sulle schede. Questa filosofia di progetto offre molti vantaggi, il principale dei quali è quello di rendere facili e agevoli le riparazioni. La singola scheda è infatti un'unità funzionale in tutto simile a un circuito integrato, per cui a un suo eventuale malfunzionamento si può porre rimedio con la sua semplice sostituzione. In caso di guasto, mentre il circuito integrato non è ricuperabile, la scheda può essere riparata.

L'intervento di riparazione effettuato con queste modalità si limita all'individuazione dell'unità funzionale che presenta un funzionamento anomalo, e può perciò essere eseguito anche da personale non particolarmente qualificato, in tempi ridotti e quindi con costi non elevati. Sono inoltre possibili interventi di manutenzione che minimizzano i tempi di fermata delle apparecchiature controllate dall'apparato elettronico.

Le apparecchiature elettroniche basate sui microprocessori usate per controllare apparecchiature industriali utilizzano largamente questa tecnica costruttiva e di progetto. Molte aziende producono propri sistemi a microprocessore realizzati su schede a formato unificato (Eurocard 100 × 160 mm o Doppio Eurocard 160 × 233,4 mm) che possono essere acquistate come semplici unità funzionali. Per usarle l'utente deve solo programmarle nel modo richiesto dall'applicazione; in caso di guasto può sostituirle come se fossero componenti. Questi sistemi sono in genere formati da una scheda centrale contenente il microprocessore, le memorie, i dispositivi di I/O, e da altre schede in grado di effettuare tutte le principali elaborazioni richieste a un microcalcolatore (▸ ***Vol. 2, Mod. F, Cap. 21***).

Le schede industriali più comuni sono:

— schede per il controllo del video e di unità a dischi;
— schede di conversione analogico/digitale e digitale/analogico;
— schede con alimentatori;
— schede di I/O provviste di optoisolatori.

Tutte queste schede sono facilmente collegabili per mezzo di schede di interconnessione a circuito stampato.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Perché un tecnico, quando sceglie un certo assemblaggio di un'apparecchiatura elettronica, deve fare molta attenzione alla dissipazione del calore? Quali accorgimenti costruttivi può adottare?
2. Come può essere suddiviso il cablaggio di un'apparecchiatura elettronica?
3. Descrivi la tecnica di cablaggio modulare.

5 DOCUMENTAZIONE DI UN'APPARECCHIATURA ELETTRONICA

Qualsiasi progetto elettronico e, più in generale, qualsiasi progetto tecnico inizia con una prima fase in cui una certa apparecchiatura o un particolare componente vengono commissionati da un cliente singolo o dalla dirigenza di un'azienda che avverte, dopo attente ricerche di mercato, l'opportunità economica di produrlo (con profitto). Il cliente o la direzione commerciale espongono il loro problema con il linguaggio proprio del processo fisico in esame, e quindi descrivono pressioni, forze, carrelli che si muovono, pacchi, bottiglie con o senza etichetta ecc.; spetta al tecnico comprendere il problema pratico e proporre l'uso dei trasduttori adatti a tradurlo in segnali trattabili (in modo economico) in forma elettronica. Il suo ruolo richiede al tecnico conoscenze generali di fisica, chimica ed economia per dialogare in modo costruttivo con l'interlocutore, in modo da evidenziare tutti gli aspetti del problema: dall'ambiente di utilizzo ai modi di impiego dell'apparecchiatura.

Da questi pochi cenni si capisce che la fase iniziale del processo di acquisizione di una commessa di lavoro è fondamentale: se non è gestita correttamente si rischia di non riuscire a comprendere a fondo il proble-

ma da risolvere, e quindi di fissare specifiche di progetto incoerenti con il risultato desiderato, realizzando apparecchiature inadatte e destinate a generare contenziosi legali, e notevoli danni economici e di reputazione per l'azienda cliente.

Per affrontare proficuamente questa fase bisogna possedere capacità di analisi e di sintesi, oltre a sapersi rapportare agli altri evitando gli antagonismi e instaurando un rapporto fiduciario che favorisca il buon esito del progetto in corso. Per alcuni queste doti sono innate, ma per altri, per timidezza o per eccessivo individualismo, risultano molto difficili da acquisire. Comunque, poiché la moderna organizzazione del lavoro non lascia molto spazio agli individualisti è indispensabile possedere buone capacità di comunicazione interpersonale.

Questa fase della commessa si concretizza in una serie di contatti personali ed epistolari in cui ciascuna parte fa richieste e pone problemi e/o fornisce risposte fino a giungere a un contratto che definisce, in modo chiaro e univoco, le caratteristiche tecniche dell'apparecchiatura, i tempi di consegna, il prezzo (con l'eventuale margine di oscillazione e le condizioni che possono modificarlo), i tempi di accettazione dell'apparecchiatura, le spese accessorie di imballaggio e consegna (se dovute), le certificazioni e le garanzie offerte con le relative condizioni di validità.

Una volta ottenuta la commessa, il passo successivo è la definizione delle specifiche del problema: vanno individuati i segnali di ingresso e di uscita dell'apparato elettronico, le sue caratteristiche elettriche (statiche e dinamiche), le implicazioni tecnico-economiche di ogni possibile scelta coerente con le specifiche assegnate; tutto questo porta alla realizzazione dell'apparecchiatura.

La **documentazione tecnica** completa di un'apparecchiatura elettronica è formata da un insieme di testi e disegni idonei a illustrare il progetto, rendere possibile la realizzazione e guidare il montaggio del circuito stampato, eseguire il cablaggio ed effettuare il collaudo finale.

Una documentazione tecnica completa dovrebbe comprendere:

1. lo schema elettrico del circuito;
2. l'elenco dei componenti e le caratteristiche tecnologiche dei materiali;
3. il preventivo di spesa riguardante i componenti elettronici e i tempi di lavorazione, di cablaggio e di collaudo;
4. i disegni di fabbricazione del circuito stampato, ossia:
   - lo schema della disposizione dei componenti sulla scheda,
   - le pellicole ottenute dai disegni delle connessioni del circuito stampato (*master*),
   - il disegno del piano di foratura,
   - il disegno per la maschera di saldatura per la deposizione della vernice protettiva sulla superficie della scheda (*solder resist*),
   - il disegno per la riproduzione serigrafica della disposizione e dei riferimenti di identificazione dei componenti;
5. la relazione tecnica del progetto con la descrizione del principio di funzionamento dell'apparecchiatura e delle sue parti;
6. le norme e le specifiche per il montaggio del circuito stampato e per il cablaggio dell'apparato elettronico;
7. le norme e le specifiche per il collaudo della scheda e dell'apparecchiatura;
8. le norme d'uso dell'apparecchiatura (libretto d'istruzioni).

CEI
– Comitato elettrotecnico italiano
IMQ
– Istituto marchio di qualità

L'apparecchiatura elettronica è accompagnata anche da una certificazione di conformità alle prescrizioni imposte dalla normativa in merito alla sicurezza e da certificazioni di garanzia. Queste ultime vengono rilasciate dal CEI dopo aver sottoposto l'apparecchiatura, in laboratori autorizzati, ai controlli previsti dalla normativa. Un'altra certificazione importante è quella rilasciata dall'IMQ (▸ *Vol. 1, Mod. I, Cap. 23*).

La certificazione di garanzia precisa entro quali limiti l'azienda produttrice si assume l'onere di garantire il corretto funzionamento dell'apparecchiatura e di provvedere alla sua riparazione o sostituzione. Il limite di tempo per legge non può essere inferiore a 12 mesi, ma per esigenze commerciali talvolta le aziende, a loro rischio, estendono tale limite a periodi di tempo superiori.

Certe apparecchiature, poi, non possono essere prodotte se non sono state richieste e ottenute particolari licenze e autorizzazioni a enti pubblici autorizzati per legge a rilasciarle.

È compito del tecnico preparare la documentazione e le dichiarazioni di conformità che permettono all'azienda di avviare la procedura necessaria per ottenerle.

6 SCELTA DELLA CATEGORIA DI RISCHIO DELL'ATTREZZATURA

Una serie di norme Ue riguarda la sicurezza dei macchinari; si tratta di norme polivalenti applicabili a tutti i tipi di macchina non regolamentati da norme o leggi specifiche: tutti i macchinari motorizzati e che hanno parti in movimento, macchinari composti da diversi apparati, parti che modificano le funzioni o le strutture di una macchina, componenti che operano sulla macchina stessa.

La conformità dei prodotti alle normative di sicurezza viene certificata dal produttore mediante l'apposizione sui prodotti del **marchio Ce** (principio dell'autocertificazione); rientra nella responsabilità del costruttore stabilire obiettivamente il livello di rischio di una macchina scegliendo per essa lo standard di sicurezza che considera adeguato.

Gli standard attualmente in vigore definiscono tre gruppi:

— **standard A**, riguarda i principi generali di progettazione applicabili a tutte le macchine;
— **standard B**, sono norme più dettagliate suddivisibili nelle sottocategorie **B1**, dedicata agli aspetti ergonomici della progettazione, e **B2**, relativa ai dispositivi di protezione, agli interruttori interbloccati di sicurezza ecc.;
— **standard C**, comprendente le norme in continua evoluzione che riguardano specifici macchinari.

Lo **standard europeo armonizzato** (PRE 954-1), relativo alla progettazione di circuiti di controllo a prova di guasto, definisce cinque livelli di rischio. La ***figura 17.21*** mostra una lista articolata di numeri e lettere che si riferiscono a categorie di rischio e definiscono lo standard di sicurezza garantito da una data attrezzatura; si tratta di una lista solo indicativa perché i costruttori restano comunque responsabili dei loro prodotti.

Le categorie considerate sono elencate di seguito.

- **Categoria B**: i componenti di controllo e di sicurezza di un sistema devono essere progettati, scelti e assemblati per soddisfare le esigenze operative entro i limiti di progetto. La maggior parte delle apparecchiature domestiche rientra in questa categoria; nessun'altra specifica è richiesta a patto che i componenti siano dimensionati correttamente.

- **Categoria 1**: i sistemi relativi alla sicurezza devono impiegare componenti e criteri di progetto ben sperimentati. La logica elettronica cablata, i microcontrollori e i PLC (guidati da un programma software) non sono considerati adeguati a questo livello di sicurezza.

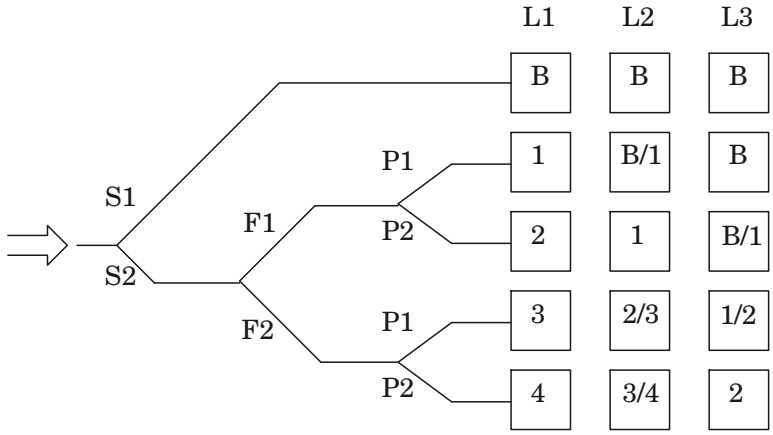


Fig. 17.21
Categorie di rischio per il progetto di un impianto.

S gravità di possibili infortuni:
S1 ferita superficiale (contusione)
S2 ferita grave (amputazione)
F frequenza dell'esposizione al pericolo:
F1 rara
F2 da frequente a continua
P possibilità di evitare il pericolo:
P1 buona
P2 scarsa
L probabilità di rischio:
L1 molto bassa
L2 bassa
L3 molto alta

- **Categoria 2**: si deve impedire l'avvio della macchina quando il guasto viene rilevato durante la fase di accensione; i circuiti di sicurezza devono quindi garantire la ridondanza mediante l'interazione di relè ausiliari e l'autocontrollo in fase di accensione. I segnali di ingresso, come i pulsanti di emergenza o bloccaporta, vanno ispezionati regolarmente.

- **Categoria 3**: l'impianto va progettato in modo tale che qualsiasi guasto si evidenzi non conduca alla perdita delle funzioni di sicurezza. Il circuito ridondante, in questo caso, dev'essere applicato sia ai dispositivi di uscita sia a quelli di ingresso, prevedendo circuiti a due canali separati (i cavi non debbono seguire lo stesso percorso).

- **Categoria 4**: ogni singolo guasto del sistema dev'essere segnalato; per questo è richiesta non solo la ridondanza dei segnali di ingresso e d'uscita, realizzati con circuiti a canali separati, ma anche le funzioni di autocontrollo e le verifiche incrociate.

La ***tabella 17.2*** elenca le principali norme europee vigenti dedicate all'equipaggiamento elettrico delle macchine e dei dispositivi di sicurezza.

Tabella 17. 2 Norme europee sull'equipaggiamento elettrico delle macchine e i componenti di sicurezza

NORMA EUROPEA	DESCRIZIONE
EN 60204-1	equipaggiamento elettrico delle macchine; regole generali
EN 60204-1/A1	equipaggiamento elettrico delle macchine; disegni, schemi, tabelle e istruzioni
EN 60204-11	equipaggiamento elettrico delle macchine con presenza di circuiti a media tensione
EN 292-1 e EN 292-2	concetti fondamentali e principi generali di progettazione
EN 414	regole per la presentazione e progettazione delle norme di sicurezza
EN 418	comandi d'arresto d'emergenza
EN 574	comandi a due mani
EN 953	progettazione e costruzione dei ripari
EN 954-1	sistemi di controllo correlati alla sicurezza
EN 1088	dispositivi di interblocco
EN 50110-1	dispostivi elettrosensibili; requisiti generali
EN 50110-2	dispostivi elettrosensibili; fotocellule
EN 50110-3	dispositivi elettrosensibili; interruttori di prossimità

7 VALUTAZIONE DEI COSTI E DETERMINAZIONE DEL PREZZO DI VENDITA

A un certo livello di conoscenza tecnologica quasi ogni prodotto è realizzabile: il fattore discriminante fra la possibilità di realizzarlo e la sua realizzabilità effettiva è costituito dai costi, dall'ampiezza e dalle caratteristiche del mercato disponibile. In altre parole, dalla differenza tra prezzo e costo che deve garantire un profitto a chi produce.

Il compito del progettista, ottenute le specifiche del prodotto da un cliente o dopo un'analisi della domanda espressa dal mercato, è quello di soddisfarle completamente, scegliendo configurazioni circuitali e tecniche di connessione, di assemblaggio, di taratura, di collaudo, di gestione degli acquisti, di imballaggio e di spedizione che minimizzino i singoli costi e il costo globale dell'apparecchiatura.

La minimizzazione dei costi può essere ottenuta:

— riducendo la quantità dei materiali utilizzati (e quindi aumentando l'affidabilità globale dell'apparecchiatura) e scegliendo configurazioni basate su circuiti integrati a larga integrazione ;
— riducendo i tempi di lavorazione mediante assemblaggi automatici, eliminando le operazioni di taratura, automatizzando le operazioni di saldatura e di collaudo;
— acquistando semilavorati (i cavi di connessione, per esempio, possono essere tagliati a misura, intestati e connessi ai connettori da una ditta appaltatrice);
— appaltando alcune lavorazioni a ditte specializzate in modo da avere costi e tempi di consegna certi.

Fondamentale, poi, per la valutazione dei costi e la scelta di quali lavorazioni e tecniche costruttive adottare, sono il volume di produzione globale e i tempi di consegna previsti.

Il prezzo dei dispositivi elettronici, ma in generale di tutte le merci, diminuisce all'aumentare della quantità acquistata, per cui è diverso prevedere un volume di produzione di alcune decine o di migliaia di pezzi. Il tempo di consegna influenza invece le modalità di approvvigionamento, i costi di immagazzinaggio, i flussi di cassa dell'azienda (gli intervalli fra quando paga le merci acquistate e quando riceve i pagamenti per quelle vendute).

Per grossi volumi di produzione occorre bilanciare gli acquisti in base alle previsioni di vendita, in modo da non rendere oneroso il costo di immagazzinaggio dei dispositivi in attesa di essere utilizzati in produzione. In questo caso la responsabilità del progettista è grande: infatti, se il progetto prevede configurazioni circuitali, magari anche brillanti dal punto di vista della scelta tecnica e tecnologica, che utilizzano dispositivi prodotti da una sola azienda (che può così imporre le proprie politiche di prezzo) oppure dispositivi non facilmente reperibili, esiste la concreta possibilità che, nel momento in cui il dispositivo dev'essere acquistato, non risulti disponibile, o diventi così costoso da rendere inaccettabili i costi dell'apparecchiatura.

Certamente una soluzione possibile sarebbe quella di acquistare le quantità di dispositivi necessarie per l'intera produzione appena il progetto produttivo viene approvato, ma, come abbiamo già osservato, questa soluzione ha anch'essa dei costi (oneri finanziari, occupazione e manutenzione del magazzino) che, posti in relazione con i volumi di prodotto da realizzare, possono dimostrarsi inaccettabili.

Ai costi di produzione bisogna poi aggiungere una frazione dei costi gestionali dell'azienda, le spese sociali (tasse, assistenza sociale ecc.), le spese fisse (attrezzature e macchinari), le spese varie (trasporti, gestione commerciale ecc.) per ottenere il costo totale.

Il prezzo finale viene ottenuto aggiungendo al costo totale il **profitto normale**, che è dato dalla rendita finanziaria ottenibile con un qualsiasi altro impiego del capitale investito nella produzione. Il prezzo ottenuto dev'essere tale da incontrare un numero di compratori sufficiente ad assorbire la quantità di apparecchiature prodotta.

All'origine del processo di produzione, individuata l'esigenza da soddisfare e il mercato disposto ad assegnare a essa un valore economico (ossia disponibile a pagare per soddisfarla), c'è una chiara definizione delle caratteristiche di ciò che si vuole produrre, definizione alla quale contribuiscono, ciascuno con la propria competenza professionale, ricercatori di mercato, tecnici pubblicitari, tecnici utilizzatori e tecnici progettisti.

La figura del progettista è centrale per le scelte tecnico-economiche che determinano la realizzabilità del prodotto, e ancora più complessa e difficile è la fase preliminare alla messa in produzione di un'apparecchiatura, ossia quella in cui occorre fare un **preventivo di costo**. In questo caso l'esperienza e la preparazione del tecnico emergono in tutta la loro rilevanza perché:

— una sottostima dei costi renderebbe impossibile la successiva produzione; per mantenere il margine di profitto previsto diventerebbe necessario rinegoziare il prezzo di vendita a fronte di un impegno contrattuale che potrebbe non prevedere, e quindi non riconoscere, la validità di una tale variazione; il profitto potrebbe scendere al di sotto di quello normale cancellando la convenienza di produrre, oppure il prez-

zo di vendita potrebbe non compensare neppure i costi di produzione, che così avverrebbe in perdita;
— una sovrastima dei costi farebbe invece aumentare in maniera eccessiva il prezzo finale del prodotto, inducendo quindi ad abbandonare il progetto a tutto vantaggio di un concorrente in grado di gestire meglio i propri costi.

Tutte queste considerazioni mettono in evidenza che il tecnico progettista non è chiuso in una torre d'avorio dove può scegliere la migliore soluzioni tecnica del problema propostogli alla luce delle proprie preferenze, ma deve integrarsi, con grande responsabilità, in una struttura organizzativa complessa.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Qual è il ruolo dell'analisi preventiva dei fattori di rischio nel progetto di un'apparecchiatura elettronica?
2. Che cos'è un coefficiente di sicurezza?
3. Quali accorgimenti costruttivi si possono adottare nella costruzione di un'apparecchiatura elettronica se nell'ambiente di utilizzo sarà sottoposta a vibrazioni?
4. Quali sono le principali tecniche di cablaggio che possono essere utilizzate per realizzare un prototipo?
5. Descrivi la tecnica di progetto modulare a schede. Quali vantaggi offre?
6. Che cos'è e da quali documenti è costituta la documentazione tecnica di un'apparecchiatura elettronica?
7. Per quanto riguarda la sicurezza, come viene valutato il fattore di rischio di un impianto o di un'apparecchiatura?
8. Da che cosa è influenzato il costo di un'apparecchiatura elettronica?
9. Ai fini della realizzazione di un preventivo di costo di successo che influenza ha la sottostima dei costi?

SINTESI DEL MODULO J

CAPITOLO 17

Un aspetto importante della progettazione elettronica è l'analisi preventiva dei **fattori di rischio** finalizzata a evitare l'insorgere di errori di progetto che provocherebbero costosi interventi di modifica.

— L'individuazione del **grado di protezione IP** minimo che il contenitore dell'apparecchiatura deve possedere è di fondamentale importanza. Un insufficiente grado di protezione può generare indeterminatezza del contatto elettrico nei commutatori elettromeccanici (connettori, interruttori ecc.), formare contatti accidentali fra circuiti di norma separati, provocare cortocircuiti.

— La presenza di **vibrazioni** è accettabile solo se se ne è tenuto conto in sede di progetto, dotando l'apparecchiatura di morsetti antiallentamento, prevedendo l'impiego di componenti di massa modesta e, se necessario, dotati di fili di guardia che li vincolino strettamente alla piastra del circuito stampato.

Molti parametri indicati dai costruttori nei fogli tecnici che documentano i dispositivi elettronici sono solo valori statistici; è quindi necessario, in fase di progettazione, effettuare il dimensionamento dei componenti adottando nei calcoli dei **coefficienti di sicurezza** molto ampi.

Terminata la fase di analisi delle specifiche di progetto e scelti i componenti e la configurazione circuitale più adatti, si realizza un **modello dell'apparecchiatura** applicando una delle tecniche di laboratorio che permettono una rapida realizzazione.

— Una volta che le **prove sul modello** hanno dimostrato che il circuito soddisfa le specifiche di progetto, si realizza l'apparecchiatura completa seguendo gli stessi criteri costruttivi che saranno poi utilizzati nella fabbricazione del prodotto finale. In fase di progetto occorre scegliere un **metodo di cablaggio** dei componenti e una loro disposizione sulle schede tali che sia possibile effettuare le necessarie operazioni di calibrazione e di misura nel modo più semplice e rapido.

— Nelle applicazioni industriali l'apparecchiatura è realizzata suddividendo il circuito in più unità funzionali cablate su moduli separati, interconnessi con un'apposita scheda o con un cablaggio eseguito con cavi elettrici.

— La scelta o il dimensionamento del **contenitore** devono essere compiuti valutando il volume d'aria che esso racchiuderà e il modo in cui il calore prodotto dall'apparecchiatura verrà eliminato. Questa analisi tende a evitare che gli apparati elettronici racchiusi nel contenitore offrano prestazioni inferiori a quelle richieste, o addirittura non funzionino affatto a causa di un aumento della temperatura dovuto al calore sviluppato durante il normale funzionamento o provocato da fattori ambientali esterni.

La **documentazione tecnica** completa di un'apparecchiatura elettronica è formata da un insieme di testi e di disegni che descrivono con efficacia il progetto e ne rendono possibile la realizzazione dal montaggio del circuito stampato al cablaggio, sino al collaudo finale dell'apparecchiatura.

La sicurezza dei macchinari è oggetto di una normativa polivalente applicabile a tutti i macchinari motorizzati e che hanno parti in movimento, macchinari composti da diversi apparati, parti che modificano le funzioni o le strutture di una macchina, componenti che operano sulla macchina stessa.

— La conformità dei prodotti alle normative di sicurezza viene certificata dal produttore con l'apposizione sui prodotti del **marchio Ce** (principio dell'autocertificazione).

La figura del progettista è centrale per le scelte tecnico-economiche che determinano la realizzabilità del prodotto, in particolare nella fase preliminare alla messa in produzione di un'apparecchiatura, ossia quella in cui occorre fare un **preventivo di costo**.

— La valutazione del prezzo di vendita di un prodotto è un processo complesso. La **sottostima dei costi** rende impossibile la successiva produzione, dato che per mantenere il margine di profitto previsto diventerà necessario ridefinire i termini contrattuali, oppure prevedere una discesa del prezzo di vendita al di sotto dei costi di produzione sostenuti. La **sovrastima dei costi** ha conseguenze altrettanto gravi perché può fare aumentare in maniera eccessiva il prezzo finale del prodotto, inducendo ad abbandonare il progetto a tutto vantaggio di un concorrente in grado di gestire meglio le proprie risorse.

MODULO J

VERIFICHE

1.
Descrivi l'andamento del tasso di guasto disegnando la curva detta "a vasca da bagno" e identificando su di essa i tre periodi fondamentali di vita di un prodotto industriale.

2.
Che cosa rappresenta l'affidabilità di un'apparecchiatura elettronica? Come interagiscono le differenti affidabilità attribuite a ciascuno dei suoi componenti? Da che cosa dipende l'affidabilità di un apparato elettronico complesso?

3.
A che cosa serve il parametro "probabilità di guasto"?

4.
Che cosa definisce il parametro "tempo medio di inutilizzazione"?

5.
Sul quadro di controllo di un'apparecchiatura si accendono una spia gialla e una blu. Quali informazioni trasmettono?

6.
Quand'è che un'apparecchiatura va "messa in sicurezza"? Fai un esempio applicativo significativo.

7.
Da che cosa dipende la qualità di un prodotto elettronico? Come si effettua un controllo di qualità?

8.
Quali caratteristiche deve avere una procedura di collaudo efficiente?

9.
Quali vantaggi offre il montaggio dei componenti a circuito stampato rispetto al montaggio manuale effettuato con saldature punto a punto?

10.
Come si determina il prezzo di vendita di un'apparecchiatura elettronica?

MODULO K

Ingegnerizzazione del progetto

CAP 18 CIRCUITI ANALOGICI DI POTENZA

CAP 19 MICROCALCOLATORI

CAP 20 APPLICAZIONI DEI CIRCUITI DIGITALI

Prerequisiti

- Caratteristiche elettriche, meccaniche e tecnologiche dei componenti passivi ed elettromeccanici.
- Principio di funzionamento, caratteristiche elettriche, termiche e meccaniche dei dispositivi a semiconduttore discreti.
- Caratteristiche elettriche delle principali famiglie micrologiche.

Obiettivi

Conoscenze

- Principali linguaggi utilizzati nella programmazione dei dispositivi elettronici.
- Sviluppo di un metodo di analisi e di progettazione elettronica completo ed efficace.

Competenze

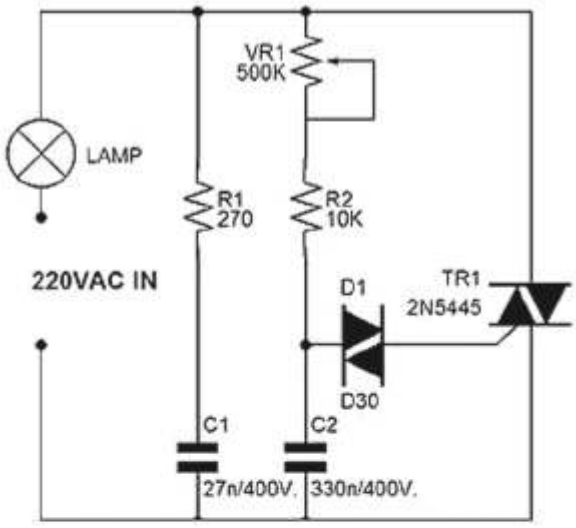
- Saper progettare un'apparecchiatura elettronica scegliendo tra soluzioni con componenti micrologici e con componenti programmabili.
- Saper realizzare apparecchiature elettroniche complete.
- Saper realizzare e collaudare la messa a punto di un'apparecchiatura elettronica utilizzando la strumentazione reale e virtuale.

CAP 18 CIRCUITI ANALOGICI DI POTENZA

1 Regolatore di intensità luminosa
2 Regolatore di intensità luminosa con optoisolatore
Applicazione: Progetto del circuito regolatore di intensità luminosa con optoisolatore
3 Controllo di velocità per motori a corrente alternata

Concetti chiave

- Parzializzazione di fase
- Progettazione modulare
- Light dimmer
- Pendolamento
- Rapporto intrinseco di stand-off
- PWM
- Trasformatore di impulsi
- Sincronizzazione
- Snubber network
- Tensione di breakover



CAP 19 MICROCALCOLATORI

Concetti chiave

- Comunicazione seriale
- Programmazione In-circuit
- PWM
- Struttura Harvard
- Watchdog timer

1 Criteri per la selezione di un microcalcolatore
2 Metodi di programmazione dei microcontrollori PIC
3 Microcalcolatore PIC16F628
4 Contatore di programma
5 Port di ingresso e uscita
6 Periferiche
7 Funzioni speciali
8 Scheda di sviluppo per PIC16F628
9 Microcalcolatore PIC16F877

RISORSE ONLINE *Applicazione: Terminale di visualizzazione con modulo LCD*

L'approccio ai microcalcolatori sviluppato in questo capitolo permette di affrontare le problematiche di progetto più complesse utilizzando i dispositivi con le maggiori capacità funzionali.

Per le conoscenze di base, su hardware e software, riguardanti i microcalcolatori PIC e l'ambiente di sviluppo dei programmi scritti in assembler, rimandiamo al ***volume 2*** (▸ ***Mod. F, Capp. 17 e 21***). Il PIC16F84A, che abbiamo già descritto, è ormai un componente obsoleto che trova limitatissimi campi di impiego. Il suo studio è stato utile perché la sua semplicità d'uso ci ha permesso di analizzare, senza eccessiva difficoltà, le principali problematiche dovute all'utilizzo di un dispositivo programmabile e agli strumenti di sviluppo e di programmazione disponibili sul mercato.

Un'applicazione commerciale di successo richiede un costo dell'apparecchiatura contenuto a fronte di un'affidabilità incrementata. Queste prestazioni richiedono dispositivi sempre più completi e complessi, capaci di controllare un gran numero di linee di ingresso-uscita e di effettuare complesse funzioni di conversione dei segnali analogici e digitali, collegabili con interfacce seriali, strumenti e PC.

In questo capitolo presenteremo alcuni PIC dell'ultima generazione, evidenziandone le possibili applicazioni.

1 CRITERI PER LA SELEZIONE DI UN MICROCALCOLATORE

PEEC
– PMOS electrically erasable cell

I **microcalcolatori PIC Flash** presentano una compatibilità a livello di pin e di codice tale per cui è possibile migrare con facilità da un PIC all'altro e da una serie di prodotti a un'altra a mano a mano che le applicazioni diventano più complesse. Sono i **PEEC** realizzati con tecnologia di processo PMOS, per i quali il costruttore garantisce 100 000 cicli di cancellazione e scrittura su memoria di programma Flash, 1 000 000 di cicli di cancellazione e scrittura su memoria di programma EEPROM e 40 anni di ritenzione dei dati. Incapsulati in contenitori di varia forma da 8 a 80 pin, hanno una memoria di programma che varia da 1 K a 63 Kword. La capacità di conversione dei convertitori analogico-digitali arriva fino a 10 bit.

I PIC sono dotati di interfacce di comunicazione quali RS-232, I^2C™, SPI™ e bus industriali come il Can 2.0B. Sono tutti programmabili con la tecnologia In-Circuit Serial Programming™, che permette di programmare, cancellare e riprogrammare il microcomputer senza doverlo estrarre dalla scheda applicativa.

I criteri che il tecnico dovrebbe seguire per selezionare il microcalcolatore più adatto a un'apparecchiatura elettronica sono i seguenti:

— disponibilità;
— prezzo;
— facilità d'uso (all'inizio è meglio utilizzare microcalcolatori Flash che si possono programmare e riprogrammare senza essere rimossi dal circuito);
— qualità e prezzo dei sistemi di sviluppo;
— disponibilità di note applicative, progetti di riferimento, pagine web;
— configurazione e prestazioni del microcalcolatore (linee di I/O, interfacce seriali **USART**, convertitori A/D e D/A, contatori, velocità, spazio di memoria per il codice e i dati ecc.;
— facilità di trasferire conoscenze e applicazioni dai microcontrollori più piccoli (a basso prezzo) ai più grandi (con prestazioni migliori).

USART
– Universal synchronous/ asynchronous receiver/transmitter

Il microcontrollore PIC di base, utilizzato per iniziare a comprendere le problematiche di progetto hardware e software dei sistemi a microcontrollore, è il PIC16F84, ma oggi questo componente viene usato solo per applicazioni di tipo hobbistico ed è stato sostituito dal PIC16F628.

I microcontrollori attualmente più utilizzati sono (▸ ***Tab. 19.1***):

— il **PIC16F628**, rispetto al microcontrollore 16F84 possiede un'area di memoria per il codice due volte maggiore, più spazio RAM e un'interfaccia seriale USART ma è più costoso; il suo successo è dovuto al fatto che è pin-to-pin compatibile con il PIC16F84, per cui è possibile convertire le applicazioni hardware modificando il software e non l'hardware dell'applicazione;
— il **PIC16F877**, costa il doppio di un PIC16F84A, ma possiede un'area per il codice otto volte maggiore (8 Kbyte), 368 byte di RAM e ben 34 linee di ingresso-uscita, un'interfaccia seriale USART e un'interfaccia seriale MSPP (per SPI e I^2C) e un convertitore analogico-digitale;
— il **PIC18F452**, appartiene a una nuova serie di PIC a 16 bit che utilizza un set di istruzioni più numeroso, il doppio dell'area di memoria dati e di codice del programma a un prezzo solo leggermente superiore a quello del PIC16F877.

Tabella 19.1 Principali microcalcolatori della famiglia PIC (*fonte*: Microchip)

TIPO DI MICROCALCOLATORE PIC	TIPO DI CONTENITORE	INGRESSI/ USCITE	MEMORIA DI PROGRAMMA (Kbyte)	MEMORIA DATI (byte)	MEMORIA EEPROM	PERIFERICHE	VELOCITÀ DI ESECUZIONE DEI PROGRAMMI (MIPS)
12C509	Sdip8	6	1	41		osc	1
12F629	Sdip8	6	1	64	128	A/D, osc	5
16F84	Sdip18	13	1	68	64		2,5
16F628	Sdip18	16	2	224	128	D/A, usart	5
16F877	Wdip40	33	8	368	256	A/D, mspp	5
18F452	Wdip40	34	16	1536	256	A/D, mspp	10

Nota A/D: convertitore analogico-digitale; D/A: convertitore digitale-analogico; mspp: consente i collegamenti seriali con I^2C e SPI; osc: oscillatore; USART: interfaccia seriale asincrona.

Alcune caratteristiche di un microcalcolatore PIC sono desumibili dalla sigla di identificazione, che è composta da:

- un **prefisso**:
  — 12 per i chip che impiegano contenitori a otto terminali;
  — 16 per i chip a 12 e 14 bit racchiusi in contenitori con più di otto terminali;
  — 18 per chip con uno spazio indirizzabile a 16 bit;

- una **lettera** che si riferisce al tipo di memoria utilizzata per la memorizzazione del codice:
  — C EPROM (OTP o con finestra), è cancellabile mediante esposizione ai raggi ultravioletti in circa 20 minuti;
  — F Flash, è cancellabile in-circuit (senza rimuovere la memoria dal circuito applicativo) in poche decine di millisecondi;
  — JW EPROM, con finestra di cancellazione;

- un **numero di identificazione** univoco per ogni dispositivo della serie;

- una **A**, presente solamente in alcuni casi, indica dei microcalcolatori (di tipo A) simili per molti aspetti a quelli di tipo non A con la stessa sigla, ma diversi per gli algoritmi di programmazione e la velocità della frequenza di oscillazione.

Ogni PIC viene prodotto in molte varianti che differiscono per uno o più parametri come il campo di variazione della temperatura, il tipo di contenitore, la velocità massima di clock, il basso consumo energetico (*low power*).

Un PIC ha numerose opzioni per il segnale di clock:

HS high-speed crystal (4 ÷ 20 MHz);
XT medium-speed crystal (200 kHz ÷ 4 MHz);
LP low power (32768 Hz ÷ 200 KHz), ottenuto da un quarzo dello stesso tipo di quello impiegato negli orologi digitali;
RC con resistenza e capacità esterne al microcontrollore.

In molte applicazioni, il cristallo di quarzo può essere sostituito con un meno costoso risonatore ceramico, le prime tre modalità (HS, XT e LP) possono essere usate anche se l'oscillatore è completamente esterno al microcalcolatore connettendo il segnale al pin osc1.

Il PIC16F628, oltre alle opzioni descritte prevede anche il modo ER, che richiede una sola resistenza esterna; il condensatore è interno.

2 METODI DI PROGRAMMAZIONE DEI MICROCONTROLLORI PIC

Un PIC, per effettuare la programmazione di un microcalcolatore imposta la modalità di funzionamento programmazione (*programming mode*) e utilizza i terminali di interfaccia per registrare il codice oggetto del programma. I PIC elencati nel paragrafo precedente utilizzano tutti i due terminali RB6 e RB7 per registrare il programma (**programmazione seriale**).

Per porre un PIC nel modo programmazione ci sono due possibilità:

1. applicare una tensione elevata (circa + 14 V) al terminale MCLR che, per questo impiego, è anche chiamato **HVP**;
2. applicare un livello logico alto al terminale di abilitazione **LVP** (terminali RB3, RB4 o RB5 a seconda del tipo di PIC impiegato) durante un'operazione di reset.

HVP
– High voltage programming
LVP
– Low voltage programming

Tutti i microcalcolatori PIC supportano la modalità HVP e solo pochi, e più recenti, la modalità LVP. Quest'ultima modalità presenta il vantaggio di utilizzare una sola tensione di alimentazione + 5 V, per cui la porta parallela del PC può essere più facilmente interfacciata con il PIC per mezzo di un buffer HCT. Questa soluzione nella programmazione dei PIC presenta, peraltro, lo svantaggio che il terminale di abilitazione LVP, utilizzato per abilitare il modo programmazione, non può essere utilizzato dall'applicazione che impiega il microcalcolatore. Ciò non costituisce un grave problema per i PIC come il 16F877 o il 18F452, che hanno 33 linee di I/O, ma per alcuni modelli di PIC, dove il port B è la sola interfaccia I/O disponibile, tale limitazione è grave.

Nel caso di una nuova applicazione, il fatto che un pin del port B sia dedicato alla programmazione del PIC non costituisce un problema perché è sufficiente tener conto della circostanza come vincolo progettuale e non utilizzare il pin di programmazione per altri scopi. Più difficile, anche in presenza di una compatibilità pin-to-pin hardware dei dispositivi, è adattare un'applicazione già realizzata perché il terminale di abilitazione può essere già impiegato per altri scopi.

Un dispositivo nuovo ha di default, al momento della fabbricazione, la modalità di funzionamento LVP abilitata; è quindi necessario, prima di poterlo impiegare, modificare il bit LVP che si trova nella locazione H′2007′ del registro CONFIG, noto anche come **device fuses**, inserendo nel programma la direttiva:

```
_CONFIG   _LVP_OFF
```

L'accesso a questa locazione di memoria può avvenire solo nella fase di programmazione del dispositivo e non con un indirizzamento diretto, pertanto la modifica dev'essere effettuata programmando il dispositivo in modalità HVP (supportata da tutti i PIC). Solo dopo questa operazione di scrittura si può utilizzare il terminale di programmazione RB come una normale linea di I/O.

I PIC più recenti, come il PIC16F87X, possono essere programmati senza tensioni elevate (HVP) o terminali dedicati (LVP), è quindi possibile evitare la disponibilità di un programmatore. Il PC comunica con programma residente nel microcontrollore da programmare, bootloader autochiamante, che scrive il codice oggetto del programma nella memoria e avvia l'applicazione.

Questa tecnica di programmazione presenta, però, alcun svantaggi:

— occorre scrivere il programma bootloader nel microcalcolatore prima di usarlo;
— il programma occupa 256 celle di memoria;
— alcuni progetti richiedono i collegamenti di alcuni specifici terminali del microcalcolatore con il PC, facendo così diminuire il numero di pin a disposizione per le applicazioni;
— la procedura di reset è più complessa in quanto si deve scegliere tra avviare l'applicazione o il bootloader;
— talvolta il programma applicativo è incompatibile con un bootloader perché entrambi usano lo stesso spazio di memoria.

In molti casi la comunicazione tra PC e microcalcolatore viene realizzata utilizzando l'USART del PIC, le due linee (RC6 e RC7), e la porta seriale del computer.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Quali sono le caratteristiche principali delle diverse serie di microcalcolatori PIC?
2. Quale caratteristica fondamentale distingue il microcalcolatore PIC dagli alti microprocessori e microcalcolatori?
3. Qual è il tempo di esecuzione di un'istruzione se l'oscillatore impiega un quarzo da 4 MHz?
4. Quali criteri guidano la scelta di un microcalcolatore da impiegare in un'apparecchiatura elettronica?

3 MICROCALCOLATORE PIC16F628

Le principali caratteristiche del PIC16F628 sono le seguenti:
— memoria di programma Flash: 2048 istruzioni;
— memoria dati RAM: 224 byte (8 bit);
— memoria EEPROM dati: 128 byte;
— port di ingresso-uscita: 2 port da 8 bit;
— periferiche:
  - 3 temporizzatori (a 8 e 16 bit),
  - 1 modulo capture/compare/PWM,
  - 2 comparatori analogici,
  - 1 generatore di tensione di riferimento,
  - 1 USART.

Nella ***figura 19.1*** viene mostrata la distribuzione dei segnali sui terminali del PIC16F628, che utilizza un contenitore DIL a 8 pin.

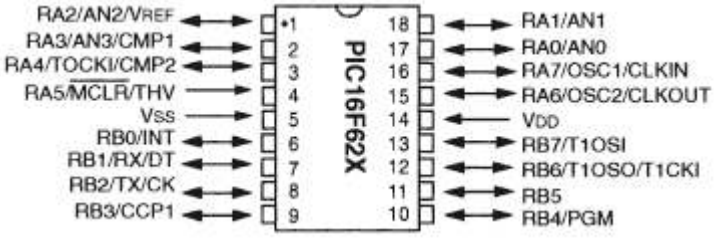


Fig. 19.1
Configurazione dei terminali del PIC16F628 (*fonte*: Microchip).

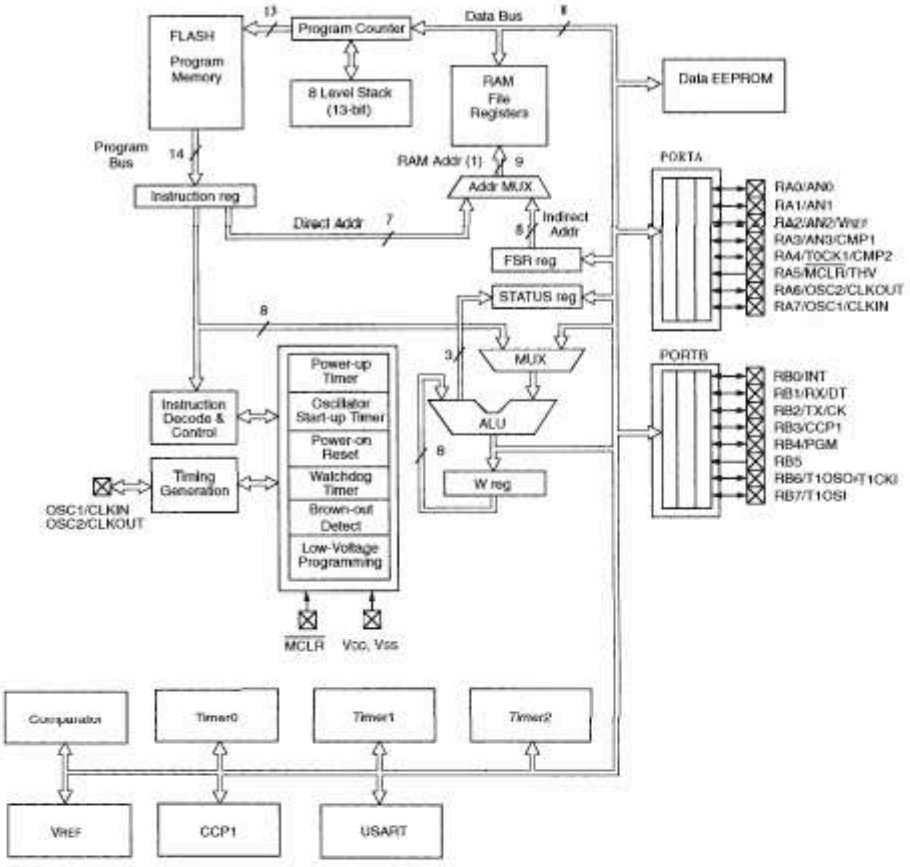
La tensione di alimentazione applicata a questo dispositivo può variare da 3 a 5,5 V e la frequenza di oscillazione del clock può giungere fino a 20 MHz. Tale frequenza rappresenta un valore notevole per un dispositivo realizzato in tecnologia CMOS.

Le caratteristiche del PIC16F628 sono, sotto molti punti di vista, identiche a quelle che abbiamo descritto a proposito del PIC16F84A, per cui in questo capitolo faremo solo brevi cenni agli aspetti descrittivi di questo componente (▸ ***Vol. 2, Mod. F, Cap. 21***).

Architettura

Il microcalcolatore è composto da un'unità centrale e da periferiche. Il suo funzionamento è gestito da un circuito che, in funzione dei modi operativi, fornisce i segnali di controllo a ciascun modulo (▸ ***Fig. 19.2***).

Fig. 19.2
Architettura interna del PIC16F628 (*fonte*: Microchip).

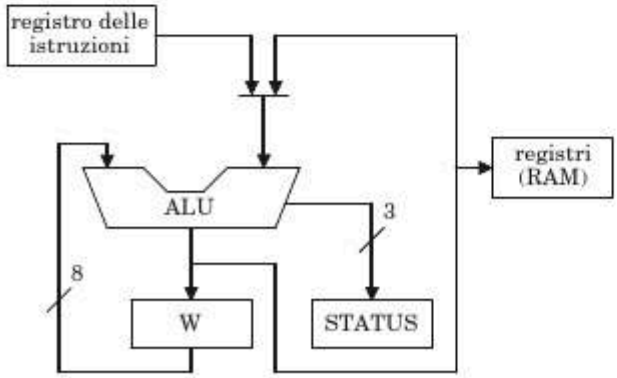


Device	Memory		
	FLASH Program	RAM Data	EEPROM Data
PIC16F627	1024 x 14	224 x 8	128 x 8
PIC16F628	2048 x 14	224 x 8	128 x 8
PIC16LF627	1024 x 14	224 x 8	128 x 8
PIC16LF628	2048 x 14	224 x 8	128 x 8

RISC
– Reduced instruction set computer

Il funzionamento dell'unità centrale è del tipo **RISC**, e quindi il suo set di istruzioni è alquanto ridotto: è solo di 35 istruzioni. L'unità centrale è il cuore del microcalcolatore ed è composta da tre elementi (▸ ***Fig. 19.3***):

Fig. 19.3
Nucleo centrale di un microprocessore PIC.



— ALU, l'unità aritmetico-logica a 8 bit e il suo registro di stato;
— W, il registro di lavoro o accumulatore;
— i registri di uso generale.

Le istruzioni che seguono aiutano a capire le operazioni effettuate nell'unità centrale.

— ADDLW 0xFF ; W ← W (op) valore immediato
— ADDWF registro, destinazione ; destinazione ← W (op) registro
— MOVWF registro ; registro ← W
— MOVF registro, destinazione ; destinazione ← registro
— INCF registro, destinazione ; destinazione ← registro ± 1
— INCFSZ registro, destinazione ; destinazione ← registro ± 1 più il test

dove:

(op) rappresenta un'operazione aritmetica o logica
destinazione rappresenta la destinazione dei dati (W o il registro usato)

Istruzioni

Le istruzioni del PIC16F628 possono essere classificate in tre gruppi.

1. **Istruzioni che coinvolgono un registro interno**. Il codice macchina ha la seguente struttura (parola di 14 bit):

CODICE DELL'OPERAZIONE	DIREZIONE **D**	INDIRIZZO DEL REGISTRO **F**
6 bit	1 bit	7 bit

2. **Istruzioni che permettono l'accesso ai bit isolati**:

CODICE DELL'OPERAZIONE	BIT **BBB**	INDIRIZZO DEL REGISTRO **F**
4 bit	3 bit	7 bit

3. **Istruzioni di controllo** che coinvolgono l'accumulatore W e un numero k
generale:

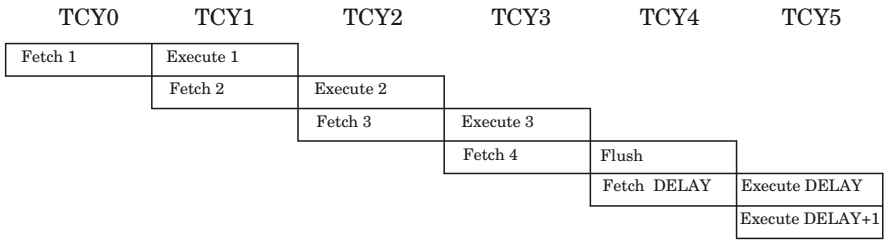
CODICE DELL'OPERAZIONE	LITERAL **K**
6 bit	8 bit

solo le istruzioni CALL e GOTO:

CODICE DELL'OPERAZIONE	LITERAL **K**
3 bit	11 bit

Il processore è pilotato da un generatore di segnale che divide il clock di sistema per quattro; la durata di un ciclo macchina è quindi quattro volte più lunga del periodo dell'orologio.

L'acquisizione e l'esecuzione di un'istruzione sono collegate (*pipelined*) in modo tale che la fase di acquisizione utilizza un intero ciclo macchina, mentre la fase di decodifica e di esecuzione ne utilizza un altro. In ogni caso, grazie al collegamento in pipeline, durante la fase di fetch dell'istruzione corrente viene decodificata ed eseguita anche l'istruzione precedente, e in questo modo ogni istruzione viene eseguita in un solo ciclo (▸ ***Fig. 19.4***). Quando invece un'istruzione modifica il contatore di programma, per completarla sono necessari due cicli macchina.



1. MOVLW H'OF'
2. MOVWF PORTA
3. CALL DELAY
4. BSF PORTB,4
5. Esegue l'istruzione che si trova all'indirizzo DELAY

Fig. 19.4
Flusso di acquisizione-decodifica-esecuzione di un'istruzione con collegamento pipeline.

Il set di istruzioni comprende le 35 istruzioni che sono comuni a tutti i microcontrollori PIC (▸ ***Vol. 2, Mod. F, Cap. 21***).

Memorie

La struttura Harvard si caratterizza per il fatto di mantenere i dati e i codici del programma memorizzati in due aree di memoria differenti. Le parole di codice sono lunghe da 12 a 14 bit, a seconda dei modelli di microcalcolatore, e sono memorizzate in una ROM interna inaccessibile dall'esterno. In questo modo tutte le istruzioni possono essere codificate in una sola parola di codice consentendo un'esecuzione molto rapida del programma; si perdono però alcune funzionalità legate alla disponibilità di una ROM esterna, come quella di utilizzare un simulatore di ROM esterno per la messa a punto del programma.

OTP
– One type PROM

Nessun dispositivo della famiglia dei microcalcolatori PIC è privo di memoria ROM interna (ROMLess); esistono soltanto circuiti:

— con ROM interna (programmabile per mascheratura in fabbrica);
— con PROM interna cancellabile esponendo il dispositivo a una sorgente di raggi UV (EPROM), se è prevista una finestra per l'irradiazione del chip, oppure non cancellabile **(OTP)** se tale finestra non esiste.

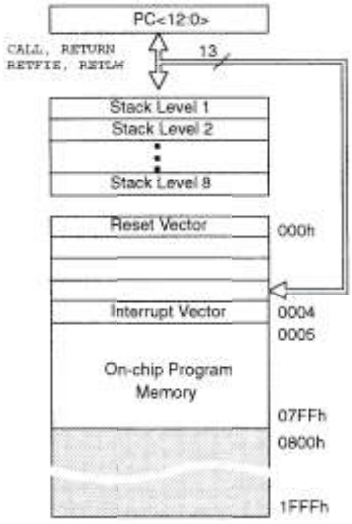


Fig. 19.5
Memoria di programma (*fonte*: Microchip).

L'area di memoria di programma indirizzabile dal PIC16F628 si estende da H'0000' a H'07FF' (2048 byte), due indirizzi sono riservati ai vettori di inizializzazione: reset H'0000' e interruzioni H'0004'. Il processore possiede una pila speciale a otto livelli per gestire gli indirizzi di ritorno dei sottoprogrammi; non esistono le istruzioni push e pop per cui non è possibile alcun controllo sullo stato della pila (▸ ***Fig. 19.5***).

La memoria dati corrisponde ai registri (*file register*) descritti per l'unità centrale, che sono di due tipi:

— i **registri di sistema**, che permettono la configurazione e il controllo dello stato del processore e delle sue periferiche, e sono accessibili in lettura o in scrittura a seconda delle loro funzioni; il microcontrollore possiede 34 registri di questo tipo;

— i **registri di uso generale**, che permettono la memorizzazione delle variabili e sono accessibili dal programma sia in lettura sia in scrittura; il microcontrollore possiede 224 registri di questo tipo.

Le istruzioni del processore permettono l'indirizzamento dei registri utilizzando solo 7 bit (128 registri). Lo spazio di memoria è più esteso per cui lo si decompone in quattro banchi di 128 registri. La ***figura 19.6*** mostra la mappa della memoria: le zone senza sigla alfanumerica evidenziano locazioni non implementate.

Il registro di stato della ***tabella 19.2*** permette di scegliere, mediante i flag RP1 e RP0, il banco a cui si vuole accedere, e di leggere i flag dell'unità aritmetico-logica (ALU) e del temporizzatore.

Il registro delle opzioni OPTION permette di configurare alcuni parametri relativi al funzionamento del port *B* e del temporizzatore timer 0 (▸ ***Tab. 19.3***).

Il registro di gestione delle interruzioni INTCON contiene i bit di abilitazione e i flag delle principali sorgenti di interruzione del microcalcolatore (▸ ***Tab. 19.4***).

I registri PIE1 e PIR1 permettono, rispettivamente, di gestire l'abilitazione e di esaminare i flag delle interruzioni (▸ ***Tab. 19.5***).

Un altro registro importante è il registro PCON, che serve per gestire le condizioni di *risveglio* del processore dopo un'operazione di reset, di sleep o di brown-out (▸ ***Tab. 19.6***).

Tabella 19.2 Registro STATUS: indirizzo 03H e 83H

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R-1	R-1	R/W-x	R/W-x	R/W-x
IRP	**RP1**	**RP0**	**T0n**	**PDn**	**Z**	**DC**	**C**
bit 7	**bit 6**	**bit 5**	**bit 4**	**bit 3**	**bit 2**	**bit 1**	**bit 0**
selezione dei banchi 0, 1 o 2, 3 nell'indirizzamento indiretto	scelta del banco (da 0 a 3) nell'indirizzamento diretto				flag zero, riporto intermedio (bit 4), riporto (carry) dell'ALU		

Nota R: bit leggibile; W: bit scrivibile; 0,1,x: stato del bit dopo un reset.

Tabella 19.3 Registro OPTION: indirizzo 81H

R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1
RPBUn	**INTEDG**	**T0CS**	**T0SE**	**PSA**	**PS2**	**PS1**	**PS0**
bit 7	**bit 6**	**bit 5**	**bit 4**	**bit 3**	**bit 2**	**bit 1**	**bit 0**
abilitazione delle resistenze di pull-up sul port *B*	selezione del fronte attivo del segnale di interruzione applicata a RB0/INT	permettono di configurare la sorgente del segnale applicato al timer 0					

Nota R: bit leggibile; W: bit scrivibile; 0,1,x: stato del bit dopo un reset.

Fig. 19.6
Memorie dati (registri).

Banco 0		Banco 1		Banco 2		Banco 3	
Indir. indiretto	00 H	Indir. indiretto	80 H	Indir. indiretto	100 H	Indir. indiretto	180 H
TMR0	01 H	OPTION	81 H	TMR0	101 H	OPTION	181 H
PCL	02 H	PCL	82 H	PCL	102 H	PCL	182 H
STATUS	03 H	STATUS	83 H	STATUS	103 H	STATUS	183 H
FSR	04 H	FSR	84 H	FSR	104 H	FSR	184 H
PORTA	05 H	TRISA	85 H		105 H		185 H
PORTB	06 H	TRISB	86 H	PORTB	106 H	TRISB	186 H
	07 H		87 H		107 H		187 H
	08 H		88 H		108 H		188 H
	09 H		89 H		109 H		189 H
PCLATH	0A H	PCLATH	8A H	PCLATH	10A H	PCLATH	18 AH
INTCON	0B H	INTCON	8B H	INTCON	10B H	INTCON	18B H
PIR1	0C H	PIE1	8C H				
	0D H		8D H				
TMR1L	0E H	PCON	8E H				
TMR1H	0F H		8F H				
T1CON	10 H		90 H				
TMR2	11 H		91 H				
T2CON	12 H	PR2	92 H				
	13 H		93 H				
	14 H		94 H				
CCPR1L	15 H		95 H				
CCPR1H	16 H		96 H				
CCP1CON	17 H		97 H				
RCSTA	18 H	TXSTA	98 H				
TXREG	19 H	SPBRG	99 H				
RCREG	1A H	EEDATA	9A H				
	1B H	EEADR	9B H				
	1C H	EECON1	9C H				
	1D H	EECON2	9D H				
	1E H		9E H				
CMCON	1F H	VRCON	9F H				
	20 H		A0 H		120 H		
96 registri di uso generale		80 registri di uso generale		48 registri di uso generale			
					14F H		
			EF H				
	70 H	accesso a 70 H -7F H	F0 H	accesso a 70 H -7F H	170 H	accesso a 70 H -7F H	1FO H
	7F H		FF H		17F H		1FF H

Tabella 19.4 Registro di configurazione delle interruzioni INTCON: indirizzo 0BH o 8BH

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-x
GIE	**PEIE**	**T0IE**	**INTE**	**RBIE**	**T0IF**	**INTF**	**RBIF**
bit 7	**bit 6**	**bit 5**	**bit 4**	**bit 3**	**bit 2**	**bit 1**	**bit 0**
BIT DI ABILITAZIONE DELLE INTERRUZIONI					**FLAG DI INTERRUZIONE**		
global interrupt enable tutte le interruzioni	peripherical interrupt enable interruzioni delle periferiche	timer 0 interrupt enable interruzione da RB0/INT	external interrupt enable interruzione da RB0/INT	port *B* change interrupt enable interruzione da RB4 ÷ RB7	interruzione causata dal time-out del timer 0	interruzione causata da una transizione attiva applicata all'ingresso RB0/INT	interruzione causata da un cambiamento di livello logico a uno degli ingressi RB4 ÷ RB7

Nota R: bit leggibile; W: bit scrivibile; 0,1,x: stato del bit dopo un reset.

Tabella 19.5 Registri di configurazione delle interruzioni dei moduli speciali e della EEPROM, PIE1 (indirizzo 8CH) e PIR1 (indirizzo 0CH)

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0		R/W-0	R/W-0	R/W-0
EEIE	**CMIE**	**RCIE**	**TXIE**		**CCPIE**	**TMR2IE**	**TMR1IE**
bit 7	**bit 6**	**bit 5**	**bit 4**	**bit 3**	**bit 2**	**bit 1**	**bit 0**
R/W-0	**R/W-0**	**R/W-0**	**R/W-0**		**R/W-0**	**R/W-0**	**R/W-0**
EEIF	**CMIF**	**RCIF**	**TXIF**		**CCPIF**	**TMR2IF**	**TMR1IF**
bit 7	**bit 6**	**bit 5**	**bit 4**	**bit 3**	**bit 2**	**bit 1**	**bit 0**
EEPROM dati	comparatori analogici	ricevitore USART	trasmettitore USART		cattura/ compara/ PWM	timer 1 e 2	

Nota R: bit leggibile; W: bit scrivibile; 0,1,x: stato del bit dopo un reset.

Tabella 19.6 Registro PCON: indirizzo 8EH

				R/W-1		R/W-q	R/W-q
				OSCF		**PORn**	**BODn**
bit 7	**bit 6**	**bit 5**	**bit 4**	**bit 3**	**bit 2**	**bit 1**	**bit 0**
				scelta della frequenza di risveglio del processore (reset, sleep, brown-out)			

Nota R: bit leggibile; W: bit scrivibile; 0,1,x: stato del bit dopo un reset.

4 CONTATORE DI PROGRAMMA

Il contatore di programma (PC, PCL e PCLATH) ha una lunghezza di 13 bit (il microcalcolatore PIC16F628 utilizza effettivamente solo 11 bit per cui può gestire 2048 linee di codice), mentre il processore gestisce dati da 8 bit e indirizzi da 11 bit. Dalla ***figura 19.7*** possiamo dedurre che il contatore di programma è suddiviso in due parti: la parte bassa (gli 8 bit meno significativi) è contenuta nel registro PCL, mentre la parte alta è accessibile solo indirettamente per mezzo del registro PCLATH.

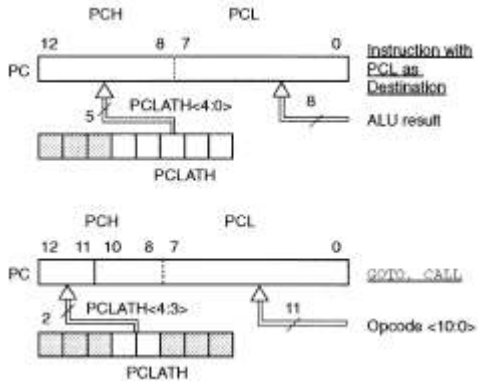


Fig. 19.7
Contatore di programma (*fonte*: Microchip).

Nel caso di un'istruzione di salto calcolata durante l'esecuzione del programma (per esempio, l'offset in una tabella), si possono modificare solo gli 8 bit di peso inferiore (PCL) del contatore; ciò comporta che una tabella non può utilizzare più di 256 celle (se si suppone di partire dall'inizio della pagina).

Indirizzamento indiretto

Il sistema di indirizzamento del PIC16F628 prevede la possibilità dell'indirizzamento indiretto con l'uso di un registro virtuale (INDF) il cui indirizzo è ottenuto grazie al registro **FSR** e al bit IRP del registro STATUS.

FSR
– File select register

Nella ***figura 19.8*** sono confrontati i due differenti metodi di indirizzamento: quello diretto e quello indiretto.

Il programma sorgente che segue utilizza l'indirizzamento indiretto per inviare il contenuto di quattro celle di memoria memorizzate nella EEPROM dati a partire dall'indirizzo TABLE sul port *B*. Le sigle utilizzate nell'esempio, e in tutti quelli successivi, sono contenute nel file P16F628.inc di MPLab e coincidono con quelle utilizzate nella documentazione tecnica del dispositivo.

```
        MOVLW   TABLE       ; inizio del blocco (indirizzo TABLE)
        MOVWF   FSR         ; registrazione del puntatore in FSR
        MOVLW   d'4'
        MOVWF   COUNTER
LOOP    MOVF    INDF,w      ; lettura del valore (indirizzo FSR)
        MOVWF   PORTB       ; invio del port B
        INCF    FSR,f       ; incremento del puntatore
        DECFSZ  COUNTER,f   ; decremento
        GOTO    LOOP        ; se non ho scritto i 4 valori sul port B
                            ripeto la sequenza
```

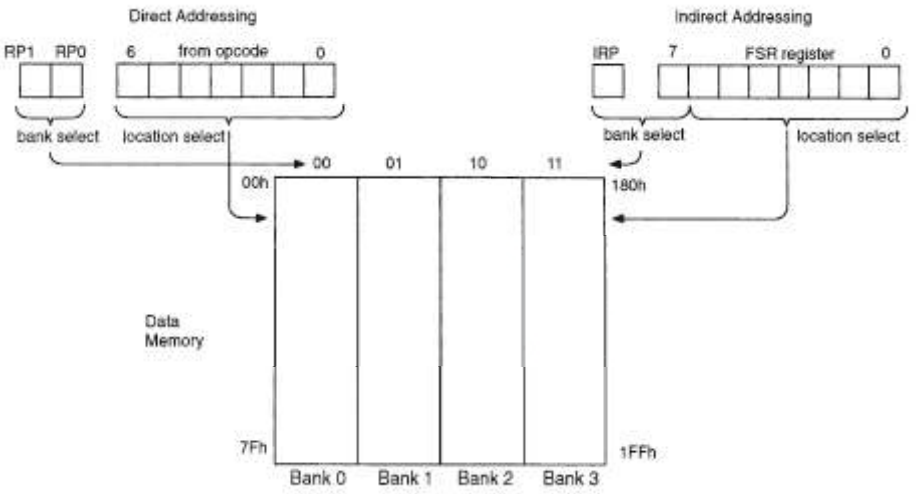


Fig. 19.8
Indirizzamento diretto e indiretto (*fonte*: Microchip).

5 PORT DI INGRESSO E USCITA

Il PIC16F628 dispone di due port di ingresso e uscita, *A* e *B*, che possono essere usati come linee di ingresso e uscita digitali standard o come linee di ingresso e uscita di periferiche speciali interne. Queste porte sono bidirezionali; la loro configurazione viene effettuata per mezzo di due registri specifici (TRISx).

Il registro TRISA, per esempio, configura una linea del port *A* come ingresso scrivendo nel bit corrispondente 1 e scrivendo come uscita 0. Quando si utilizzano le periferiche interne, per esempio l'USART, questi dispositivi sono prioritari, e quindi determinano la direzione dei dati dei terminali del dispositivo.

La ***tabella 19.7*** elenca i segnali attribuiti ai terminali del port *A*; il suo comportamento è condizionato dai registri PORTA, TRISA, CMCON e VRCON.

La ***tabella 19.8*** elenca i segnali attribuiti ai terminali del port *B*; il suo comportamento è condizionato dai registri PORTB, TRISB, OPTION e VRCON.

Il programma sorgente che segue mostra la procedura di inizializzazione dei registri di configurazione.

```
CLRF    PORTA
CLRF    PORTB
BSF     STATUS, RP0         ; passo al banco 1
BSF     OPTION_REG, 7       ; nessun pull-up sul port B
CLRF    TRISA               ; port A, tutte uscite
MOVLW   0x02
MOVWF   TRISB               ; port B, tutte uscite tranne RB1 (RxD)
BCF     STATUS, RP0         ; ritorno al banco 1
```

Tabella 19.7 Segnali attribuiti ai terminali del port A

SIGLA	NOME DEL SEGNALE	DESCRIZIONE
A7	RA7/OSC1/CLKIN	terminale di entrata per il segnale di clock di sistema
A6	RA6/OSC2/CLKOUT	terminale di uscita per il segnale di clock di sistema
A5	RA5/MCLRn/THV	terminale di reset e di programmazione ad alta tensione
A4	RA4/T0CKI	ingresso-uscita a drain aperto, ingresso per il clock del timer 0
A3	RA3/AN3	ingresso-uscita per i comparatori analogici
A2	RA2/AN2/Vref	ingresso per i comparatori analogici e uscita della tensione di riferimento interna
A1	RA1/AN1	ingresso per i comparatori analogici
A0	RA0/AN0	ingresso per i comparatori analogici

Nota Tutti i terminali sono configurabili come ingressi e uscite digitali bidirezionali.

Tabella 19.8 Segnali attribuiti ai terminali del port B

SIGLA	NOME DEL SEGNALE	DESCRIZIONE
B7	RB7/T1OSI	entrata del clock del timer 1
B6	RB6/T1OSO/T1CLK	ingresso-uscita del timer 1 e linea di clock nella modalità di programmazione del componente
B5	RB5	
B4	RB4/PGM	controllo del modo di programmazione a bassa tensione
B3	RB3/CCP1	ingresso-uscita del modulo Capture/Compare/PWM
B2	RB2/TX/CK	uscita del segnale di clock dell'USART
B1	RB1/RX/DT	ingresso dell'USART
B0	RB0/INT	ingresso di interruzione esterno

Nota Tutti i terminali sono configurabili come ingressi e uscite digitali bidirezionali.

6 PERIFERICHE

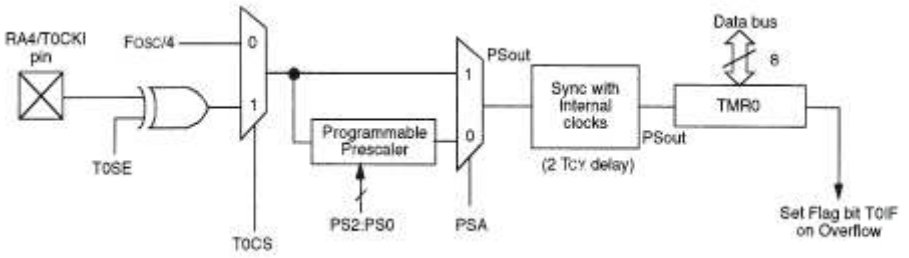
Timer

Il modulo timer 0 è un contatore a 8 bit (TMR0), accessibile in lettura e in scrittura, il suo time-out (supero del massima capacità del contatore) porta a 1 il flag di interruzione TMR0IF contenuto nel registro INTCON.

Il segnale di clock che alimenta il contatore del timer 0 può essere interno o esterno al microcontrollore con l'intermediazione di un prediviso re a 3 bit. Lo schema a blocchi del timer 0 è mostrato nella ***figura 19.9***. Perché il timer funzioni occorre scegliere la sorgente del segnale di conteggio (T0CS) e il fattore di divisione (PS2-PS0), se utilizzato (PSA), e nel caso che la sorgente del segnale sia esterna si deve abilitare il segnale

T0SE quando si verifica il time-out che alza il flag di interruzione TMR0IF nel registro INTCON. I registri interessati al funzionamento del timer 0 sono TMR0, INTCON, OPTION e TRISA (bit 4).

Fig. 19.9
Schema a blocchi del timer 0 (*fonte*: Microchip).



Il modulo timer 1 è un temporizzatore/contatore a 16 bit composto da due registri da 8 bit (TMR1H, TMR1L), che sono incrementati da 00H a FFH e ritornano a 00H.

Al verificarsi della condizione di overflow del timer 1, se nel registro PIE1 è stata abilitata la possibilità di generare un'interruzione (flag TMR1IE), il microcalcolatore esegue il programma di interruzione, in caso contrario è il programma che, monitorando in anello (*polling*) il flag TMR1IF, si accorge dell'evento e utilizza questa informazione per effettuare l'elaborazione prevista.

Il timer 1 può operare sia come temporizzatore sia come contatore. Nel modo temporizzatore incrementa il valore dei registri TMR1 a ogni ciclo d'istruzione, nel modo contatore incrementa solo quando rileva un fronte di salita, fornito da un generatore di clock esterno sul terminale RB7.

Il timer 1 viene abilitato e disabilitato mediante un bit di controllo TMR1ON presente nel registro T1CON (▸ ***Tab. 19.9***). Il modo di funzionamento viene selezionato dal flag TMR1CS; se quest'ultimo è posto a 0 il timer 1 funziona da temporizzatore, altrimenti funziona da contatore. Il ciclo di conteggio può avvenire in modo sincronizzato o meno con il clock di sistema in base allo stato del bit di controllo T1SYNC.

Il modulo timer 2 è un temporizzatore contatore a 8 bit con un predivisore (*prescaler*) e un postdivisore (*postscaler*), e viene utilizzato principalmente per generare segnali PWM. Viene gestito come il timer 0, ed è leggibile e scrivibile. Quando supera il modulo di conteggio modifica il flag TMR2IF e, se è abilitato il flag di abilitazione TMR2IE, genera un'interruzione.

Esamineremo questo temporizzatore successivamente, quando descriveremo il modulo PWM.

Comparatori analogici

Il modulo è composto da due comparatori analogici alimentati dal port *A* e dalla tensione di riferimento interna.

La ***tabella 19.10*** fornisce il registro che permette di configurare i comparatori, che possono operare nei modi descritti nella ***figura 19.10*** per realizzare moltissime configurazioni circuitali.

I registri associati alla programmazione e all'utilizzo dei comparatori analogici sono quelli mostrati nella ***tabella 19.11***.

Tabella 19.9 Registro di configurazione del timer 1 T1CON

U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
—	—	T1-CKPS1	T1CKOS0	T1OSCEN	T1SYNC	TMR1CS	TMR1ON
bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
non implementato: letto come 0		timer 1 input clock prescale select bit Valore del predivisore 11 = 1:18 10 = 1:.4 01 = 1:2 00 = 1:1		timer 1oscillator enable control bit 1 = l'oscillatore è operativo 0 = l'oscillatore è spento	timer 1 external clock input synchronization control bit TMR1CS = 1 1= non sincronizza gli input dell'orologio esterno 0= sincronizza gli input dell'orologio esterno TMR1CS = 0 questo bit viene ignorato; il timer 1 usa l'orologio interno quando TMR1CS=0	timer 1 clock source select bit 1 = clock esterno dal pin RB6/ T1OSO/ T1CKI (all'aumentare dell'orlo) 0 = clock interno (Fosc/4)	timer 1on bit 1 = timer 1 operativo 0 = timer 1 fermo

Nota R: bit leggibile; W: bit scrivibile; 0,1,x: stato del bit dopo un reset.

Tabella 19.10 Registro di configurazione dei comparatori analogici CMCON

R-0	R-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
C2OUT	C1OUT	C2INV	C1INV	CIS	CM2	CM1	CM0
bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0

bit 7 **C2OUT**: comparator 2 output
se C2INV = 0
allora:
1 = C2 V_{IN} + > C2 V_{IN}–
0 = C2 V_{IN} + < C2 V_{IN}–

se C2INO = 1
allora:
0 = C2 V_{IN}+ > C2 V_{IN}–
1 = C2 V_{IN} + < C2 V_{IN}–

bit 6: **C1OUT**: comparator 1 output
se C1INV = 0
allora:
1= C1 V_{IN}+ > C1 V_{IN}–
0= C1 V_{IN} + < C1 V_{IN}–

se C1INO = 1
allora:
0 = C1 V_{IN}+ > C1 V_{IN}–
1 = C1 V_{IN} + < C1 V_{IN}–

bit 5 **C2INV**: comparator 2 output inversion
1 = uscita C2 invertita
0 = uscita C2 non invertita

bit 4 **C1INV**: comparator 1 output inversion
1 = uscita C1 invertita
0 = uscita C1 non invertita

bit 1 **CIS**: comparator input swich
se CM2:CM0 = 001
allora:
1 = C1 V_{IN}– si connette a RA3
0 = C1 V_{IN}– si connette a RA0

se CM2:CM0 = 010
allora:
1 = C1 V_{IN}– si connette a RA3
C2 V_{IN}– si connette a RA2
0 = C1 V_{IN}– si connette a RA0
C2 V_{IN}– si connette a RA1

bit 2-0 **CM2**: **CM0**: comparator mode

Nota R: bit leggibile; W: bit scrivibile; 0,1,x: stato del bit dopo un reset.

Fig. 19.10
Modi di configurazione di comparatori (*fonte*: Microchip).

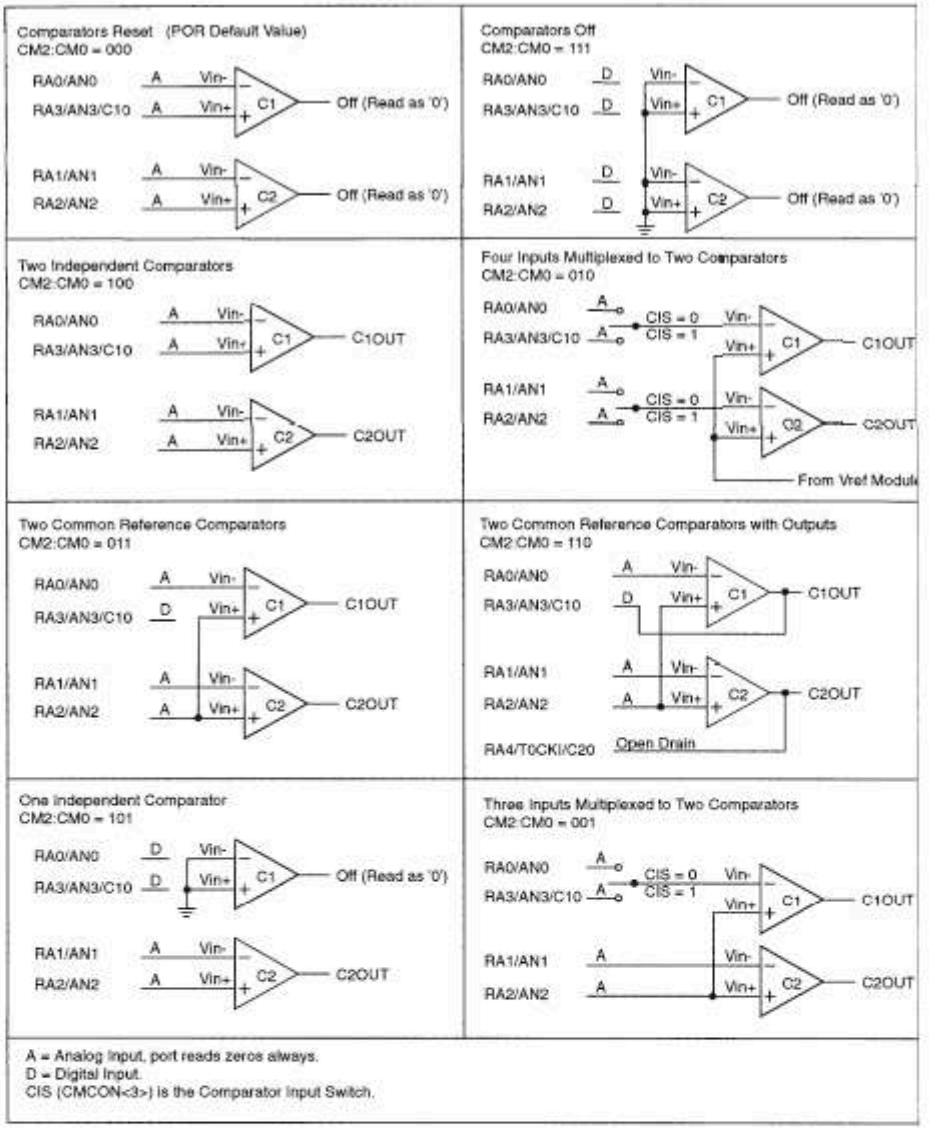


Tabella 19.11 Registri associati al modulo dei comparatori

INDIRIZZO	NOME	BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0	CONTENUTO DEL REGISTRO DOPO POR	CONTENUTO DEL REGISTRO DOPO ALTRI TIPI DI RESET
1FH	**CMCON**	**C2OUT**	**C1OUT**	**C2INV**	**C1INV**	**CIS**	**CM2**	**CM1**	**CM0**	0000 0000	0000 0000
9FH	**VRCON**	**VREN**	**VROE**	**VRR**		**VR3**	**VR2**	**VR1**	**VR0**	000- 0000	000- 0000
OBH/88H 10BH/18BH	**INTCON**	**GIE**	**PEIE**	T0IE	INTE	RBIE	T0IF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 0000
OCH	**PIR1**	EEIF	**CMIF**	RCIF	TXIF		**COP1IF**	TMR2IF	TMR1F	0000 -000	0000 -000
8CH	**PIE1**	EEIE	**CMIE**	RCIE	TXIE		**COP1E**	TMR2IE	TMRFIE	0000 -000	0000 -000
85H	**TRISA**	TRISA7	TRISA6		TRISA4	**TRISA3**	**TRISA2**	**TRISA1**	**TRISA0**	11-11 1111	11-1 1111

Tensione di riferimento

Il modulo della tensione di riferimento è costituito da una rete di 16 resistenze che permette di alimentare i comparatori. Il registro di configurazione è mostrato nella ***tabella 19.12***; lo schema a blocchi del modulo è mostrato nella ***figura 19.11***.

Per generare la tensione di riferimento occorre: abilitare il modulo (VREN, bit 7), selezionare il campo di variazione (VRR) e, mediante i flag VR3 ÷ 0, scegliere il valore della tensione di riferimento.

Tabella 19.12 Registro di configurazione della tensione di riferimento VRCON: indirizzo 9FH

R/W-0	R/W-0	R/W-0		R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
VREN	**VROE**	**VRR**		**VR3**	**VR2**	**VR1**	**VR0**
bit 7	**bit 6**	**bit 5**	**bit 4**	**bit 3**	**bit 2**	**bit 1**	**bit 0**
selezione dei banchi 0, 1 o 2, 3 nell'indirizzamento indiretto	scelta del banco (da 0 a 3) nell'indirizzamento diretto			flag zero, riporto intermedio (bit 4), riporto (carry) dell'ALU			

Nota R: bit leggibile; W: bit scrivibile; 0,1,x: stato del bit dopo un reset.

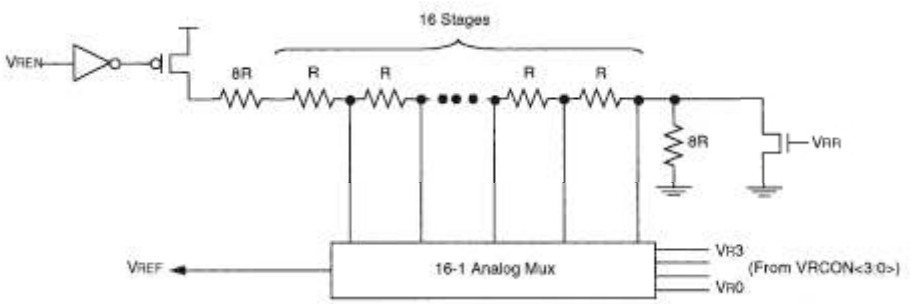


Fig. 19.11
Modulo della tensione di riferimento (*fonte*: Microchip).

Modulo Capture/Compare/PWM

Il modulo Capture/Compare/PWM contiene un registro a 16 bit che può operare come registro di memorizzazione a 16 bit (Capture), come registro comparatore a 16 bit (Compare) o come generatore di un segnale PWM.

Il registro a 16 bit, CCPR1, è formato da due registri da 8 bit: CCPR1L e CCPR1H. Le modalità di funzionamento del modulo sono controllate dai flag contenuti nel registro CCP1CON (17H) nel modo illustrato nella figura 19.14 a p. 544.

I flag CCP1M3 ÷ CCP1M0 determinano l'utilizzo di uno dei tre modi di funzionamento (cattura, compara, PWM) e le caratteristiche del segnale di comando (fronte di salita o di discesa, acquisizione dopo quattro impulsi).

Modo cattura

In questa modalità il processore cattura il contenuto del registro a 16 bit timer 1 e lo memorizza nei registri CCPR1H e CCPR1L quando sul terminale RB3/CCP1 si verifica un evento selezionato nel registro di controllo CCP1CON; questo evento può essere un fronte di salita o di discesa. Il modulo dispone di un predivisore (*prescaler*) che permette di attivare l'acquisizione dopo 1, 4 o16 transizioni.

Lo schema a blocchi della ***figura 19.12*** mostra la struttura interna del modulo CCP. Il terminale di ingresso RB3/CCP1, per essere utilizzato dal modulo dev'essere programmato nel registro di direzione dati TRISB come ingresso, mentre il timer 1 dev'essere programmato nel modo timer o come contatore sincronizzato.

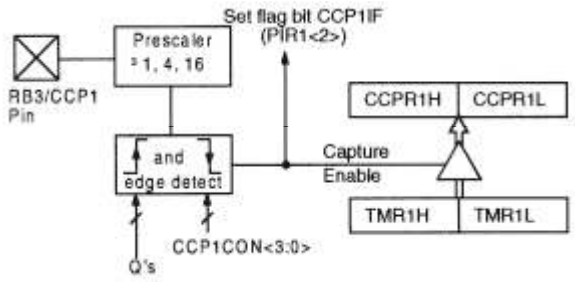


Fig. 19.12
Schema a blocchi del modulo Capture (*fonte*: Microchip).

Quando un programma applicativo cambia il fattore di divisione impostato nel prescaler, in qualche caso può avvenire che il modulo generi un segnale di interruzione indesiderato. Per evitare questo inconveniente è consigliabile disattivare prima di tutto il modo CCP, e poi cambiare il fattore di divisione:

```
CLRF    CCP1CON              ; provvede a disattivare il modulo CCP
MOVLW   NUOVO_               ; carica in W il nuovo fattore di
        METODO_CATTURA         divisione
MOVWF   CCP1CON              ; scrive nel registro il nuovo valore
```

Anche la modifica di altre opzioni riguardanti il metodo di acquisizione può comportare l'insorgere di falsi segnali di interruzione, in questo caso, prima di modificare la programmazione del registro CCP1CON è consigliabile disabilitare il flag di abilitazione delle interruzioni CCPIE. Dopo aver riprogrammato il registro CCP1CON è bene controllare anche il flag CCPIF, che segnala un'eventuale richiesta di interruzione, e resettarlo. Questo modo di funzionamento può essere utilizzato per realizzare un convertitore analogico digitale come quello delle ***figure 19.13a, b***.

Come prima operazione, il programma applicativo definisce, nel registro direzione dati TRISA, il terminale RB1 come uscita, e quello RB0/CCP1 come ingresso. Successivamente si programma il timer 1 nel modo running e si seleziona il modo cattura transizione sul fronte negativo nel registro di configurazione CCP1CON (▸ ***Tab. 19.13***). A questo punto occorre azzerare il timer 1 e portare la linea di uscita RB1 al livello logico alto; il condensatore si carica seguendo una legge esponenziale. Quando la tensione raggiunge il valore di soglia superiore dell'ingresso a trigger di Schmitt dell'inverter si genera la transizione negativa, che consente la memorizzazione del contenuto del timer 1 nei registri CCPR1H e CCPR1L, e contemporaneamente si attiva il flag

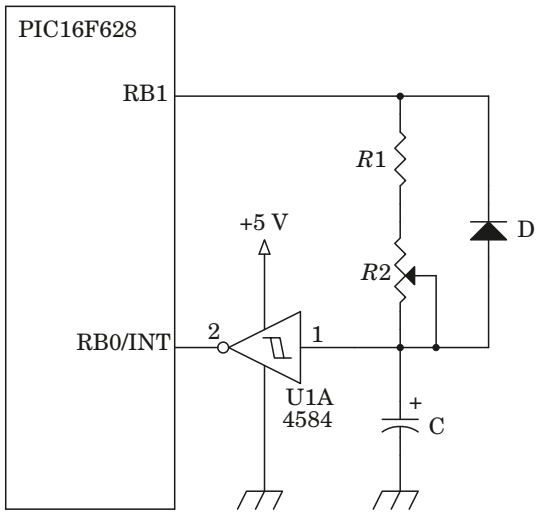
CCP1F nel registro PIR1 (▸ Tab. 19.5, p. 534). Se nel registro PIE1 era stata abilitata la possibilità di generare la transizione negativa, il programma esegue il programma di interruzione, altrimenti è il programma stesso che, monitorando in anello (*polling*) il flag CCPIF, registra l'evento ed effettua l'elaborazione desiderata.

Il valore della tensione di soglia superiore dell'inverter, che viene ricavato dai fogli tecnici, è raggiunto in tempi differenti in funzione del valo-

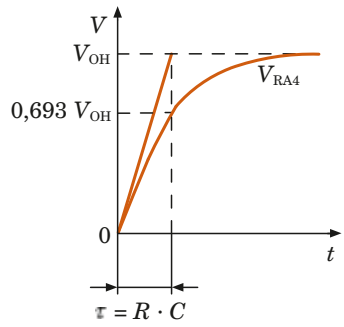
Figg. 19.13a, b
Convertitore A/D realizzato con una rete RC e modulo Capture del microcalcolatore:
a. schema elettrico;
b. andamento della tensione di carica sul condensatore.

$$V_{RA4} = V_{OH}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

dove: $R = R1 + R2$



19.13a



19.13b

Tabella 19.13 Registro CCP1CON per la configurazione del modulo Capture/Compare/PWM

U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
—	—	CCP1X	CCP1Y	CCP1M3	CCP1M2	CCP1M1	CCP1M0
bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
non implementato: letto come 0		PWM least significant bits modalità Cattura: inutilizzata modalità Confronta: inutilizzata modalità PWM: questi bit sono i due meno significativi del duty-cycle del PWM; gli otto bit più significativi si trovano in CCPRxL		CCPx mode select bits 0000 = Cattura/Confronta/PWM spento (resetta la modalità CCP1) 0100 = modalità Cattura, ogni fronte di discesa 0101 = modalità Cattura, ogni fronte di salita 0110 = modalità Cattura, ogni 4 fronti di salita 0111 = modalità Cattura, ogni 16 fronti di salita 1000 = modalità Confronta, mette a 1 l'uscita quando sono uguali (il bit CCP1IF è messo a 1) 1001 = modalità Confronta, mette a 0 l'uscita quando sono uguali (il bit CCP1IF è messo a 1) 1010 = modalità Confronta, interruzione software quando vi è uguaglianza (il bit CCP1IF è messo a 1, il pin CCP1 non ne risente) 1011 = modalità Confronta, trigger di un evento speciale (il bit CCP1IF è messo a 1; CCP1 resetta TMR1) 11xx = modalità PWM		

Nota R: bit leggibile; W: bit scrivibile; 0,1,x: stato del bit dopo un reset.

re della costante di tempo determinata dal valore del condensatore e da quello della resistenza variabile (NTC, LDR, potenziometro).

La massima risoluzione della misura si ottiene facendo in modo che il valore massimo contenuto nel timer coincida con la massima costante di tempo generata dalla rete RC; ciò può essere ottenuto agendo sia sulla frequenza di conteggio del temporizzatore sia sul fattore di prescaler. Consigliamo di utilizzare un tempo di riferimento per la misura pari alla costante di tempo perché la legge di carica della tensione sul condensatore, pur rimanendo esponenziale, è in quel tratto prossima al comportamento lineare e l'errore introdotto è minimo.

Il processo di misura può essere ripetuto scaricando il condensatore e modificando la programmazione del terminale RB1, cioè portandolo al livello logico basso. La corrente di scarica è regolata dalla resistenza $R3$.

Modo comparatore

Quando il modulo viene utilizzato come comparatore, il contenuto del registro CCPR1 viene costantemente confrontato con il contenuto del timer 1; quando i due contenuti coincidono, il terminale RB3/CCP1 può essere portato al livello logico alto o basso, o può restare immutato in funzione della modalità di funzionamento preselezionata dall'utente nel registro di configurazione CCP1CON. Anche in questo caso viene attivato il flag CCPIF del registro PIR1 che viene gestito nel programma come descritto per il modo cattura. La ***figura 19.14*** mostra lo schema a blocchi del timer 1 configurato nel modo comparatore.

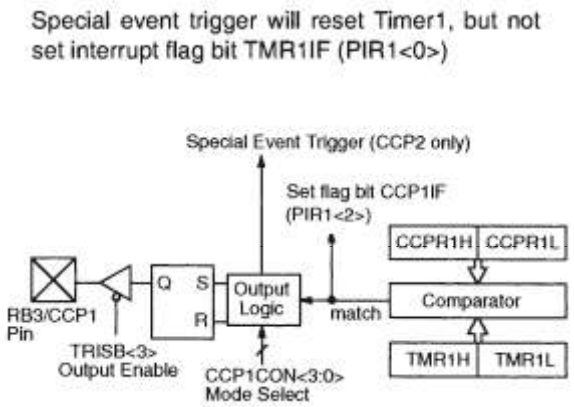


Fig. 19.14
Schema a blocchi del modulo Compare (*fonte*: Microchip).

Modo PWM

Il modo PWM del PIC16F628 può produrre un segnale di uscita PWM con una risoluzione massima di 10 bit. Il segnale PWM è un'onda quadra con un duty-cycle regolato in funzione di un segnale modulante. Se si applica a un carico il segnale PWM, opportunamente amplificato e condizionato, si può controllare il trasferimento di potenza (il che significa, regolare la luminosità di una lampada, per esempio, oppure la velocità di rotazione di un motore a corrente continua).

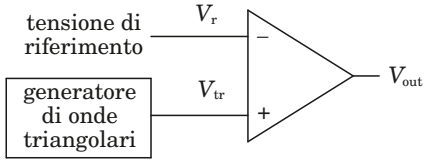
La ***figura 19.15a*** propone il circuito generatore PWM realizzato con amplificatori operazionali che abbiamo esaminato nel ***Volume 2, Mod. D, Cap. 12***. Il segnale di riferimento è fornito da un generatore di onde triangolari; il segnale modulante è in tensione continua e i due segnali sono applicati a un comparatore che genera un'onda quadra il cui duty-cycle dipende dal valore del segnale modulante (▸ ***Fig. 19.15b***).

La ***figura 19.16*** mostra lo schema a blocchi del modulo PWM. Il segnale PWM generato dal dispositivo utilizza una base tempi (periodo) e un tempo che determinano la durata della permanenza dell'uscita nello stato logico alto (duty-cycle); il temporizzatore utilizzato è il timer 2 (▸ ***Fig. 19.17***).

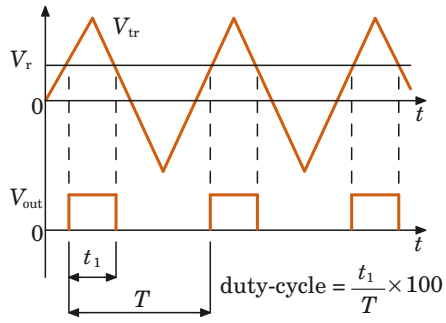
Il periodo viene definito nel registro PR2 del timer 2 e viene calcolato nel seguente modo:

$$PWM_{PERIODO} = (PR2 + 1) \cdot 4 \cdot T_{OSC} \cdot (TMR2_{PREDIVISORE}) \qquad 19.1$$

Figg. 19.15a, b
Circuito PWM analogico:
a. schema di principio;
b. forme d'onda.



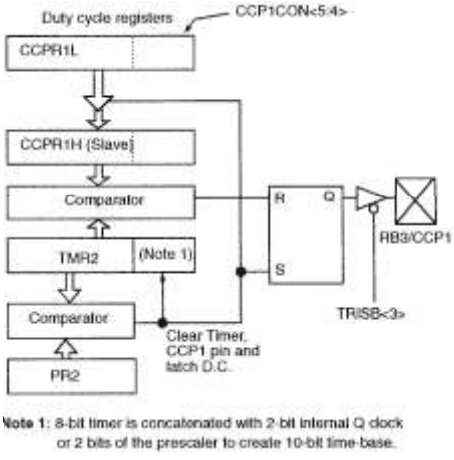
19.15a



19.15b

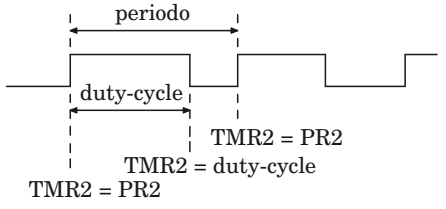
La frequenza del segnale PWM è il reciproco del periodo calcolato. Quando il contenuto del registro del timer 2, TMR2, è uguale al valore impostato nel registro PR2, si ha l'azzeramento del timer stesso; un comando di set fa commutare la memoria Set-Reset che porta l'uscita RB3/CCP1 al livello logico alto (se il duty-cycle impostato è diverso da zero), contemporaneamente il valore del duty-cycle viene trasferito dal registro CCPR1L al registro CCPR1H.

Fig. 19.16
Schema a blocchi del modulo PWM (*fonte*: Microchip).



19.16

Fig. 19.17
Uscita PWM.



19.17

Il duty-cycle viene determinato scrivendo la durata desiderata nel CCPR1L (parte più significativa) e nei bit 5 e 4 del registro CCP1CON

(parte meno significativa); in questo modo si ottiene un duty-cycle con una risoluzione di 10 bit.

Il duty-cycle viene calcolato con la seguente relazione:

$$PWM_{DUTYCYCLE} = (CCPR1L : CCP1CON < 5 : 4 >) \cdot \cdot T_{OSC} \cdot (TMR2_{PREDIVISORE}) \quad \textbf{19.2}$$

Quando il contenuto del registro del timer 2 e i 2 bit generati da un contatore interno (o dai 2 bit del prescaler) uguagliano il contenuto della memoria slave CCPR1H, la memoria Set-Reset viene resettata e l'uscita RB3/CCP1 si porta al livello logico basso.

Nella ***tabella 19.14*** sono elencati i valori di frequenza e risoluzione ottenibili con il modulo PWM.

Tabella 19.14 Valori di frequenza PWM ottenibili da Capture/Compare/PWM del PIC16F628 con un clock di sistema di 20 MHz

Frequenza PWM	1,22 kHz	4,88 kHz	19,53 kHz	78,12 kHz	156,3 kHz	208,3 kHz
Predivisore del timer (1, 4, 16)	16	4	1	1	1	1
Valore del periodo (PR2)	0xFF	0xFF	0xFF	0x3F	0x1F	0x17
Massima risoluzione (bit)	10	10	10	8	7	5,5

Per configurare il modulo CCP in modo che operi come generatore di un segnale PWM si effettuano le seguenti operazioni:

1. si scrive il periodo del segnale PWM nel registro PR2;
2. si scrive la durata del duty-cycle nel registro CCPR1L e nei bit 5 e 4 del registro CCP1CON;
3. si programma il terminale RB3/CCP1 come uscita azzerando il bit 3 del registro TRISB;
4. si programma il valore desiderato del prescaler e si abilita il timer 2 mediante il flag T2ON del registro T2CON;
5. si configurano i bit di modo CCP1M3 ÷ CCP1M0 nel registro CCP1CON in modo da selezionare il modo PWM.

EEPROM dei dati

Il PIC16F628 dispone di una zona di memoria non volatile EEPROM di 128 byte, accessibile solo utilizzando una procedura di indirizzamento indiretto mediante un registro del modulo.

È una memoria con comportamento asimmetrico:

— in lettura il funzionamento è comparabile a quello di una RAM;
— in scrittura l'operazione richiede un certo tempo per essere realizzata perché è necessario attivare i circuiti che elevano il livello di tensione ed effettuano la cancellazione della cella; questo tempo dipende da varie condizioni quali l'alimentazione, la temperatura, la tecnologia, l'invecchiamento dopo ogni scrittura che si traduce in rallentamento del processo di scrittura;
— la cancellazione permette di riportare lo stato di tutte le celle al livello logico alto.

Per limitare l'usura della EEPROM può essere interessante, prima di

effettuare l'operazione di scrittura, analizzarne il contenuto per sapere se non si devono scrivere solo 0; in questo modo si evita di cancellarla.

Per gestire il modulo si utilizzano quattro registri:

— EECON1 ed EECON2, registri di configurazione che contengono, ciascuno, solo 4 bit per il controllo delle operazioni;
— EEADR, registro di 7 bit che punta all'indirizzo desiderato;
— EEDATA, registro dati.

Il registro di configurazione è mostrato nella ***tabella 19.15***. Il registro EECON2 non ha esistenza reale e viene richiamato solo per effettuare scritture sicure dei dati contenuti nella memoria.

Tabella 19.15 Registro di configurazione EECON1: indirizzo 9BH

				R/W-x	R/W-0	R/S-0	R/S-x
				WRERR	WREN	WR	RD
bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
				(EEPROM error flag) flag che indica un errore di scrittura	abilita la scrittura nella memoria	comando di scrittura; si reinizializza automaticamente alla fine dell'operazione (non può essere forzato a 1)	comando di lettura, si reinizializza automaticamente alla fine dell'operazione, dura un ciclo macchina (non può essere forzato a 1)

Nota R: bit leggibile; W: bit scrivibile; R/S: Reset/Set; 0,1,x: stato del bit dopo un reset.

La manipolazione della EEPROM va effettuata con un protocollo imposto che illustreremo negli ***esempi 1*** e ***2*** successivi. La procedura di lettura è relativamente facile e consiste semplicemente nel porre nel registro EEADR l'indirizzo indiretto a cui si vuole accedere e nel lanciare un ordine di lettura mediante l'attivazione del flag RD del registro EECON1. L'operazione richiede un ciclo di clock.

ESEMPIO 1

PROTOCOLLO DI LETTURA DELLA EEPROM

```
; lettura della cella EEPROM indirizzata dal registro EEADR, il dato
; viene trascritto nel registro EEDATA:
        BSF     STATUS,RP0      ; passaggio al banco di memoria 1
        BSF     EECON1,RD       ; ordine di lettura della EEPROM
        BCF     STATUS,RP0      ; passaggio al banco di memoria 0
```

La scrittura richiede una procedura più complessa e comporta l'obbligo di scrivere nel registro INTCON2 la sequenza H'55' seguita da un H'AA' (evidenziata in grassetto nell'***esempio 2***).

L'operazione dura più cicli di clock e bisogna attendere la fine del processo di scrittura con un ciclo di attesa (*polling*) o con un segnale di interruzione.

ESEMPIO 2

PROTOCOLLO DI SCRITTURA DELLA EEPROM

```
; scrittura della cella EEPROM indirizzata dal registro EEADR del dato
contenuto nel registro EEDATA:
    BCF     INTCON,GIE      ; disabilitazione delle interruzioni
    BSF     STATUS,RP0      ; passaggio al banco 0
    BSF     EECON1,WREN     ; ordine di scrittura della EEPROM
    MOVLW   H'55'           sequenza imposta
    MOVWF   EECON2          dal materiale
    MOVLW   H'AA'           per la gestione
    MOVWF   EECON2          della memoria EEPROM
    BSF     EECON1,WR       ; ordine di scrittura della EEPROM
*************************************************************************
; ciclo di attesa dell'avvenuta scrittura
WAIT_EE BTFSC   EECON1,EEIF
        GOTO    WAIT_EE
*************************************************************************
    BCF     EECON1,EEIF     ; azzeramento del flag EEPROM
    BCF     EECON1,WREN     ; protezione scrittura EEPROM
    BCF     STATUS,RP0      ; ritorno al banco 0
    BSF     INTCON,GIE      ; abilitazione delle interruzoni
```

PER FISSARE I CONCETTI

1. Da quante istruzioni è composto il set di istruzioni del PIC16F628?
2. Di quante linee di I/O dispone il PIC16F628? Sono tutte identiche?
3. Quale vantaggio offre la tecnologia Flash utilizzata dal microcontrollore PIC?
4. Come funziona il modulo Capture/Compare/PWM?
5. Come si realizza un generatore PWM con un microcalcolatore?

7 FUNZIONI SPECIALI

Il PIC16F628 può essere configurato in molti modi differenti a ciascuno dei quali corrisponde un diverso modo operativo:

- la riattivazione è una procedura di uso interno per le funzioni di sistema o per l'utente;
- la generazione del segnale di clock, che può essere interno o esterno, lento o veloce;
- la temporizzazione effettuata quando al microcalcolatore viene applicata la tensione di alimentazione (Power-up timer);
- la sorveglianza sul corretto funzionamento del programma (Watchdog timer);
- la sorveglianza della tensione di alimentazione (Brown-out detect);
- la programmazione **ICSP**;
- la protezione del codice.

ICSP
– In-circuit serial programming

La scelta di queste configurazioni si compie al momento del caricamento del programma applicativo nella memoria EEPROM.

Parola di configurazione

La parola di configurazione (*device fuses*) è memorizzata in un registro speciale di 14 bit, posto all'indirizzo 2007H, inaccessibile al programma (▸ ***Tab. 19.16***). Viene dichiarata nel programma applicativo con la direttiva di compilazione CONFIG.

Tabella 19.16 Registro di configurazione CONFIG: indirizzo 2007H

CP1	CP0	CP1	CP0		CPD	LVP	BODEN	MCLRE	FOSC2	PWRTEn	WDTE	FOSC1	FOSC0
bit 13	bit 12	bit 11	bit 10	bit 9	bit 8	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0

CP0 e CP1	determinano la protezione parziale o totale del codice del programma (1 Kbyte o 2 Kbyte)
CPD	determina la protezione della memoria EEPROM
LVP	abilita la modalità di programmazione a *bassa tensione*
BODEN	(Brown-out detect enable) controlla la tensione di alimentazione
MCLRE	determina se il terminale RA5 è una linea di ingresso-uscita o una linea per il reset
PWRTEn	(Power-up timer enable) temporizzazione iniziale, quando si applica la tensione di alimentazione
WDTE	(Watchdog enable) watchdog
FOSC2÷0	permette di scegliere la configurazione dell'oscillatore generatore del clock di sistema (8 modi)

Nota R: bit leggibile; W: bit scrivibile; 0,1,x: stato del bit dopo un reset.

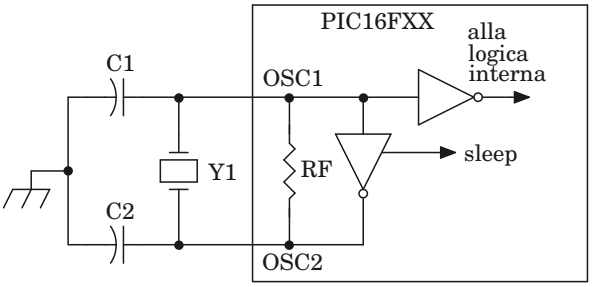
```
List p = 16f628
Include "p16f628.inc"
_CONFIG_CP_OFF & _WDT_OFF & _BODEN_OFF & _PWRTE_OFF &
_EXTCLK_OSC & _LVP_OFF & _MCLRE_ON
;    codice di protezione off
;    Watchdog timer disattivato
;    Brown-out detect inibito
;    Power-up timer disattivato
;    External clock, senza generazione del segnale CLKOUT sul pin RA6
;    Low voltage programming inibito
;    reset sul terminale RA5 (MCLR attivato)
```

Configurazione del generatore di clock

Il PIC16F628 prevede otto differenti configurazioni del generatore di clock:

— ER (External resistor), il generatore di clock è realizzato con un oscillatore del tipo RC, la capacità è interna al dispositivo mentre la resistenza, esterna, permette di determinare la frequenza di oscillazione desiderata;
— INTRC (Internal RC) usa lo stesso principio del precedente ma, in questo caso, tutti i componenti sono interni al dispositivo;
— EC, si deve fornire il segnale di clock con un generatore esterno;
— HS, XT, LP, sono i modi classici di realizzazione del circuito di clock per un microcalcolatore e consistono nel collegare un quarzo ai capi di un invertitore collocato all'interno del dispositivo; la scelta del modo dipende dalla frequenza di clock desiderata (▸ ***Fig. 19.18***).

Fig. 19.18
Circuito generatore del segnale di clock.



Configurazioni dell'oscillatore	
LP	low power crystal
XT	quarzo/risonatore
HS	quarzo ad alta velocità/risonatore
RC	resistenza/capacità

Modo	Frequenza	C1 = C2
XT	455 kHz 2,0 MHz 4,0 MHz	47 – 100 pF 15 – 33 pF 15 – 33 pF
HS	8,0 MHz 4,0 MHz	15 – 33 pF 15 – 33 pF

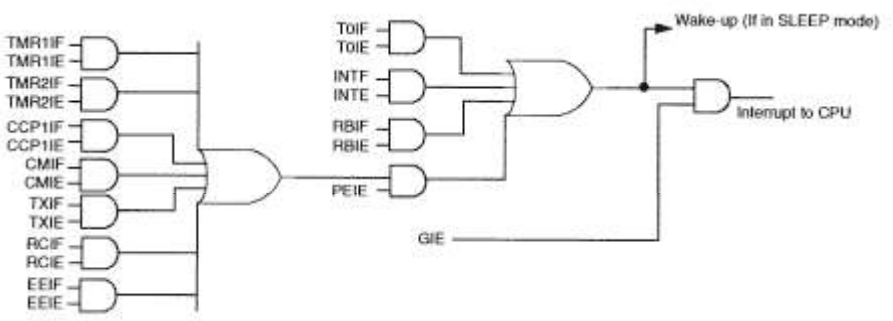
Interruzioni

Il processore dispone di 10 sorgenti di interruzione:
— interruzione esterna, applicata sul terminale RB0/INT;
— time-out del watchdog timer;
— cambiamento di stato dei terminali del port *B* da RB4 a RB7;
— moduli comparatori analogici;
— interfaccia seriale USART;
— modulo CCP (Capture/Compare/PWM);
— time-out del timer 0;
— riconoscimento di un evento (*match*) del temporizzatore 2.

Tutte queste interruzioni sono mascherabili individualmente, per gruppo o nella loro totalità. La gestione è realizzata dai registri di controllo INTCON, PIE1 e PIR1, CMCON. Ogni sorgente di interruzione è controllata da un flag di abilitazione (enable) e da un altro flag che segnala l'accadimento e che è indipendente dall'abilitazione dell'interruzione correlata.

La ***figura 19.19*** illustra la logica di gestione delle interruzioni.

Fig. 19.19
Logica di gestione delle interruzioni (*fonte*: Microchip).



ESEMPIO 3

SCRITTURA DEL PROGRAMMA DI GESTIONE DELL'INTERRUZIONE

Il programma di gestione dell'interruzione salvaguarda il contesto (registro di stato e accumulatore), determina la sorgente dell'interruzione, elabora e recupera il contesto prima di ritornare al programma principale.

```
ORG 0X04                    ; vettore di partenza delle interruzioni
MOVWF   W_TEMP              ; istruzioni pseudopush
SWAPF   STATUS,W
MOVWF   STATUS_TEMP         ; STATUS_TEMP <– STATUS (scambiate)
BCF     STATUS,RP0          ; banco 0
BCF     INTCON,GIE          ; inibizione di tutte le sorgenti di interruzione
; ricerca dell'origine dell'interruzione
BTFSC   INTCON,T0IF
CALL    SP_Int_Timer        ; time-out del timer 0
BTFSC   PIR1,CMIF
CALL    SP_Int_Compare      ; comparatore
BTFSC   INTCON,T0IF
CALL    SP_Int_RB           ; cambiamento sul port B [7..4]
; fine di gestione delle interruzioni, restaurazione del contesto e uscita
BCF     STATUS,RP0          ; banco 0
SWAP    STATUS_TEMP,W       ; istruzione pseudopop
MOVWF   STATUS              ; STATUS <– STATUS_TEMP (scambiate)
MOVF    W_TEMP,W            ; W <– W_TEMP
RETFIE                      ; ritorno al programma e riabilitazione di INTCON,GIE
```

Ricordiamo che i flag sono comunque sempre attivati, indipendentemente dall'abilitazione dell'interruzione correlata. Ciò permette di scrivere programmi che utilizzano, invece che la tecnica di gestione dell'interruzione, quella ad anello (*polling*); in questo caso è il programma applicativo che, mediante cicli, interroga lo stato del flag corrispondente all'evento che si intende rilevare e mette in esecuzione il programma di gestione.

Programmazione ICSP

La programmazione del PIC16F628 consiste nel caricare il codice del programma nella memoria Flash e i dati nella memoria EEPROM dati.

La tecnologia di queste memorie richiede una tensione elevata (circa 12 V) per la polarizzazione delle celle di memoria. Il microcalcolatore dispone di una circuiteria interna (circuito a pompa di carica) in grado di generare questa tensione, in questo caso si parla di **programmazione in bassa tensione** (LVP). È possibile, però, fornire questa tensione al componente, anche dall'esterno, e in questo caso si parla di **programmazione in alta tensione** (HVP). La scelta del modo di programmazione viene compiuta nella parola di configurazione (▸ Tab. 19.6, p. 370).

Per la programmazione è disponibile un collegamento seriale sincrono che utilizza solo tre linee:

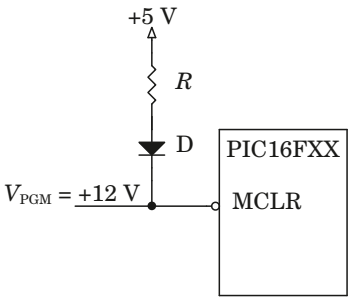


Fig. 19.20
Protezione del terminale RA5/MCLRn con un diodo.

1. una linea viene utilizzata per mettere il componente nel modo programmazione (RA5 se si usa il modo HVP o RB4 se si usa il modo LVP);
2. una linea per il segnale di clock (RB6);
3. una linea per i dati (RB7).

Si tratta del principio ICSP, che permette di programmare il componente *in situ*, vale a dire sulla scheda applicativa per mezzo di un connettore. L'uso di questa modalità operativa richiede però delle precauzioni per quanto riguarda i collegamenti del programmatore al componente:

— RA5/MCLRn è un terminale che, in fase di programmazione, è portato a + 12 V, mentre nel funzionamento normale è connesso tramite una resistenza alla tensione positiva + 5 V; per evitare che si generi una corrente diretta verso l'alimentatore che genera i + 5 V, corrente che potrebbe danneggiarlo, s'interpone un diodo in serie alla resistenza che si oppone alla circolazione della corrente stessa (▸ ***Fig. 19.20***);
— RB6 e RB7 sono componenti periferici, eventualmente connessi, che non devono influenzare il funzionamento del programmatore;
— RB4 dev'essere posto al livello logico basso per programmare la EEPROM nel modo HVP.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Quali sono le sorgenti di interruzione disponibili nel microcontrollore PIC?
2. Qual è la funzione del watchdog?
3. Quali sono i differenti tipi di configurazione del generatore di clock per i vari tipi di microcontrollori PIC?

8 SCHEDA DI SVILUPPO PER PIC16F628

La ***tavola 19.1*** propone una scheda di sviluppo che raccoglie tutte le linee del microcalcolatore PIC16F628 e le organizza in modo tale da essere predisposte per il collegamento con schede applicative.

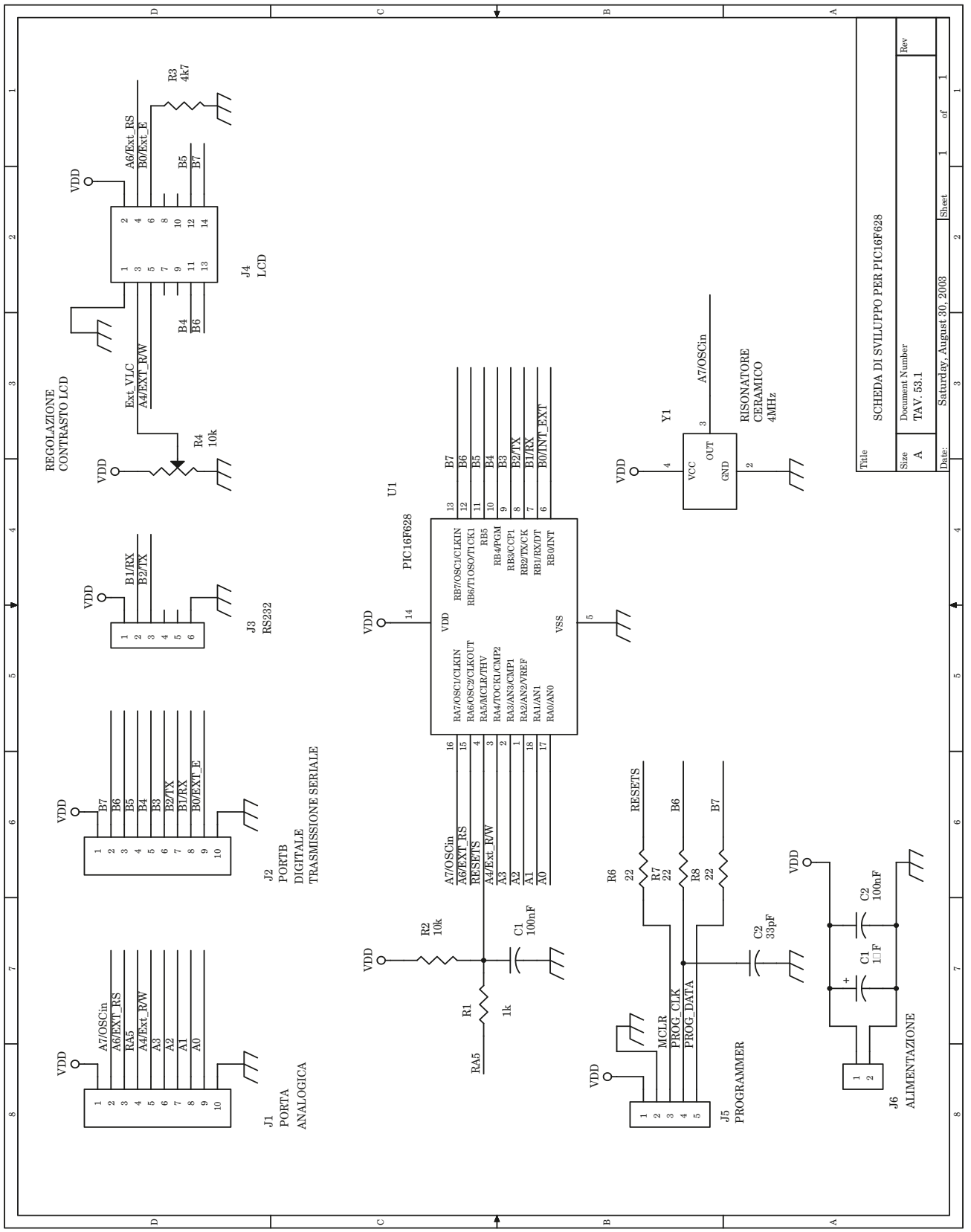
L'assegnazione dei segnali è stata fatta tenendo conto delle caratteristiche delle periferiche da controllare e delle periferiche interne al microcalcolatore. La scheda supporta la connessione di segnali analogici (J1), di linee di ingresso-uscita digitali o di una USART (J2), di un'interfaccia seriale RS-232 (J3), di un modulo LCD (J4), di un programmatore per la programmazione ICSP (J5), di alimentazione (J76).

La resistenza *R*3 pone la linea R4/PGM a massa per permettere la programmazione del PIC nel modo HVP. L'assenza di questa resistenza pone automaticamente il processore nel modo di programmazione LVP (a bassa tensione), modo che di solito non è gestito dai programmatori non professionisti.

Il trimmer *R*4 permette di regolare il contrasto del modulo LCD.

TAVOLA 19.1

Scheda di sviluppo per PIC16F628.



9 MICROCALCOLATORE PIC16F877

Il PIC16F877 è un microcalcolatore che permette di implementare applicazioni complesse. È incapsulato in un contenitore a 40 pin (▸ ***Fig. 19.21***) e possiede le seguenti caratteristiche:

— velocità operativa di clock da DC 20 MHz e durata del ciclo di istruzione di 200 ns;
— set di istruzioni RISC da 35 istruzioni;
— memoria di programma Flash da 8 Kbyte × 14 word;
— memoria dati (RAM) da 368 × 8 byte;
— memoria dati EEPROM da 256 × 8 byte;
— 14 sorgenti di interruzione interne ed esterne;
— uno stack hardware a 8 livelli;
— ICSP mediante 2 pin;
— 5 port ingresso/uscita da 8 bit;
— 3 timer;
— 2 circuiti Capture/Compare/PWM;
— convertitore A/D a 10 bit con 8 canali multiplexati;
— porta seriale sincrona (SSP) con SPI (modo master) o I^2C (master/slave);
— USART/SCI;
— **PSP** con controllo esterno dei segnali di lettura ($\overline{RD}$), scrittura ($\overline{WR}$) e selezione ($\overline{CS}$);
— circuiti **POR**, **PWRT**, **OST**, **WDT**;
— riduzione del consumo energetico in stand-by (modo sleep).

PSP
– Parallel slave port
POR
– Power-on reset
PWRT
– Power-up timer
OST
– Oscillator start-up timer
WDT
– Watchdog timer

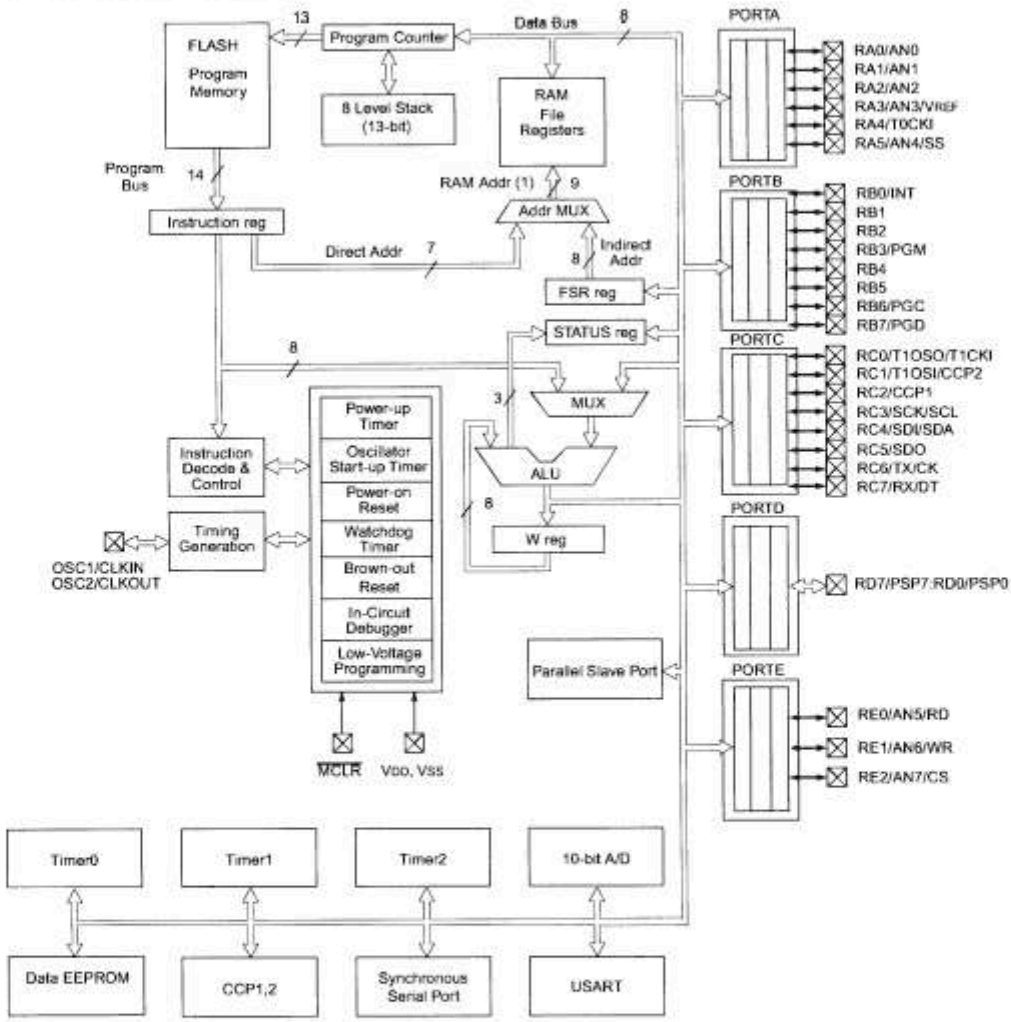
Il PIC16F877 è un componente potente che può realizzare tutte le applicazioni sviluppate dai processori che abbiamo descritto nel testo utilizzando gli stessi registri e le stesse tecniche di programmazione, esiste cioè una compatibilità software verso il basso. La compatibilità hardware di un vecchio progetto dev'essere invece valutata controllando le condizioni di reset del processore ed eventuali interferenze con i dispositivi collegati ai terminali.

Fig. 19.21
Configurazione dei terminali del PIC16F877 (*fonte*: Microchip).

La ***figura 19.22*** mostra l'architettura del microprocessore; la ***figura 19.23*** mostra la mappa della memoria dati (registri). Poiché abbiamo già descritto quasi tutte le periferiche illustrate dallo schema a blocchi dell'architettura del processore, di seguito ci soffermeremo solo sul modulo convertitore analogico-digitale.

Fig. 19.22
Architettura interna del PIC16F877 (*fonte*: Microchip).

Device	Program FLASH	Data Memory	Data EEPROM
PIC16F874	4K	192 Bytes	128 Bytes
PIC16F877	8K	368 Bytes	256 Bytes

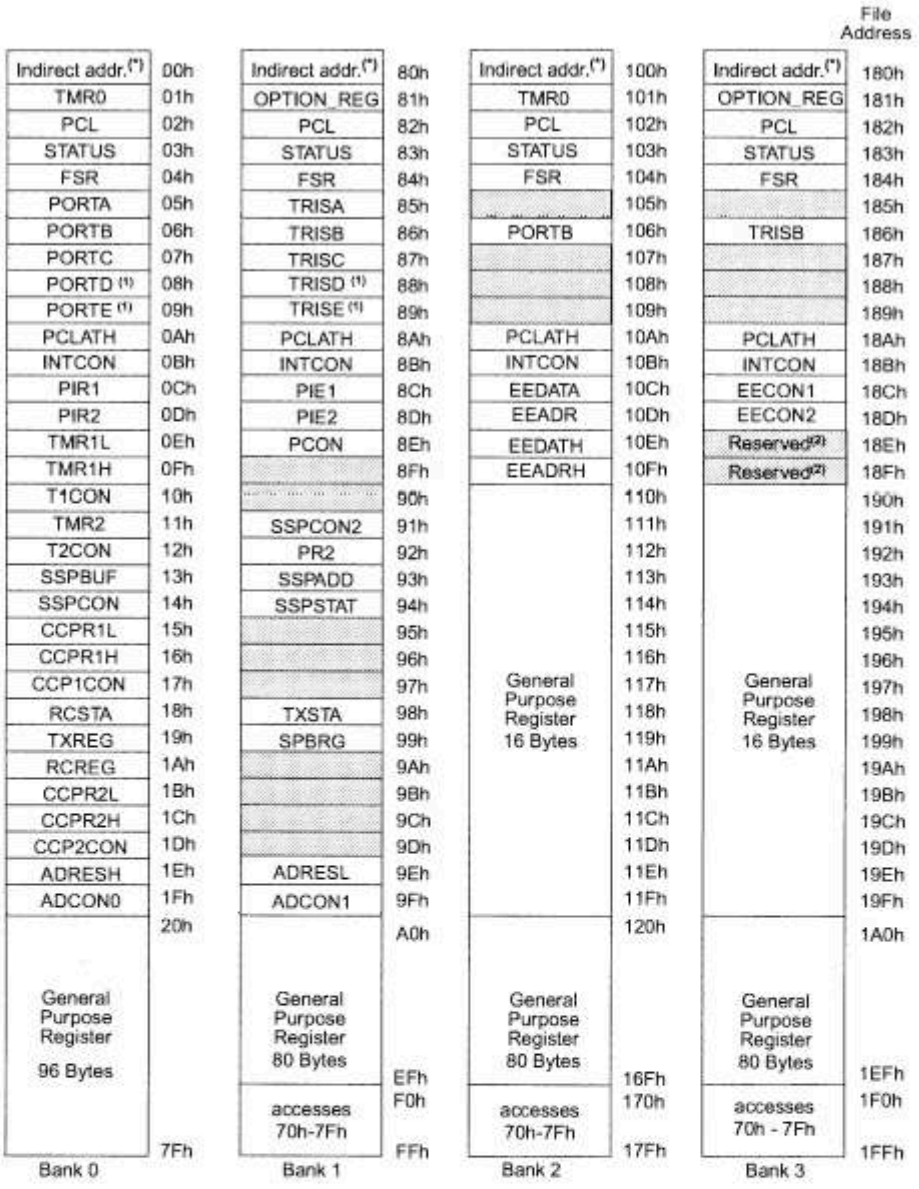


Modulo convertitore analogico-digitale

Il modulo acquisisce il segnale analogico da 8 canali multiplexati ed è provvisto di un circuito sample-and-hold che stabilizza il segnale da convertire.

L'uscita del condensatore è applicata all'ingresso di un convertitore A/D ad approssimazioni successive che genera un segnale digitale a 10 bit. Il convertitore A/D possiede una sola configurazione e può operare anche quando il microcalcolatore viene posto nello stato di basso consumo energetico (modo sleep), ricavando il segnale di clock non dal clock di sistema, che è stato fermato, ma da un oscillatore RC interno.

Fig. 19.23
Memorie dati (registri).



Il modulo, nel suo funzionamento, utilizza i due registri di configurazione ADCON0 e ADCON1, descritti dalle ***tabelle 19.17*** e ***19.18***, e due registri che contengono la parola binaria a 10 bit generata dalla conversione (ADRESH, ADRESL). I registri di configurazione permettono:

— di scegliere la frequenza utilizzata dal circuito di conversione, e quindi di determinare il tempo di conversione;
— di selezionare il canale da cui acquisire il segnale analogico;
— di attivare e disattivare il modulo convertitore A/D e il segnale di inizio conversione;
— di monitorare un flag che segnala la fine conversione;
— di selezionare, per l'insieme degli 8 canali, 16 differenti configurazioni di funzionamento; per esempio, la configurazione PCFG3:PCFG0 = 1110 configura un solo canale analogico (▸ ***Fig. 19.24 e Tab. 19.18***).

Tabella 19.17 Registro di configurazione ADCON0

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	U-0	R/W-0
ADCS1	**ADCS0**	**CHS2**	**CHS1**	**CHS0**	**GO//DONE**	**—**	**ADON**
bit 7	**bit 6**	**bit 5**	**bit 4**	**bit 3**	**bit 2**	**bit 1**	**bit 0**
A/D conversion clock select bit 00 = Fosc/2 01 = Fosc/8 10 = Fosc/32 11 = FRC (frequenza di clock derivata da una rete RC esterna al dispositivo)		analog channel select bit 000 canale 0 RA0/AN0 001 canale 1 RA1/AN1 010 canale 2 RA2/AN2 011 canale 3 RA3/AN3 100 canale 4 RA5/AN4 101 canale 5 RE0/AN5 110 canale 6 RE1/AN6 111 canale 7 RE2/AN7			A/D conversion status bit Se ADON =1 1 = la conversione A/D è in corso (ponendo a 1 questo bit si avvia la conversione A/D) 0 = la conversione A/D è terminata (viene automaticamente posto a 0 quando la conversione A/D è completata)	**non implementato**: letto come 0	AD on bit 1 = il modulo convertitore A/D è operativo 0 = il modulo convertitore A/D è spento e in condizioni di basso consumo energetico

Nota R: bit leggibile; W: bit scrivibile; 0,1,x: stato del bit dopo un reset.

Fig. 19.24
Schema a blocchi del convertitore A/D (*fonte*: Microchip).

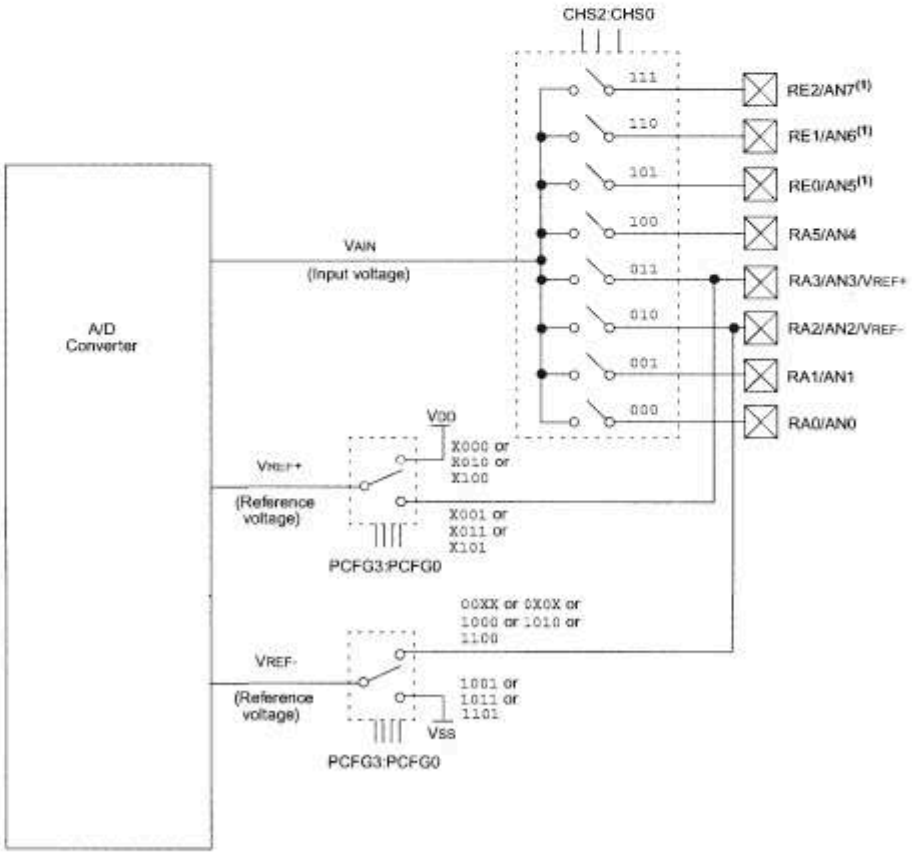


Tabella 19.18 Registro di configurazione ADCON1

U-0	U-0	R/W-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W -0	R/W-0
ADFM	**—**	**—**	**—**	**PCFG3**	**PCFG2**	**PCFG1**	**PCFG0**
bit 7	**bit 6**	**bit 5**	**bit 4**	**bit 3**	**bit 2**	**bit 1**	**bit 0**

bit 7 **ADFM:** A/D result format select
1 = giustificato a destra, i 6 bit più significativi del registro ADRESH sono letti come 0
1 = giustificato a sinistra, i 6 bit meno significativi del registro ADRESH sono letti come 0
11 = FRC (frequenza di clock derivata da una rete RC esterna al dispositivo)

bit 6-4 **non implementato**: letto come 0

bit 3-0 A/D port configuration control bit

PCFG3: PCFG0	AN7 RE2	AN6 RE1	AN5 RE0	AN4 RA5	AN3 RA3	AN2 RA2	AN1 RA1	AN0 RA0	VREF+	VREF–	CHAN/ REFS
0000	A	A	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS	8/0
0001	A	A	A	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS	7/1
0010	D	D	D	A	A	A	A	A	VDD	VSS	5/0
0011	D	D	D	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS	4/1
0100	D	D	D	D	A	D	A	A	VDD	VSS	3/0
0101	D	D	D	D	VREF+	D	A	A	RA3	VSS	2/1
011X	D	D	D	D	D	D	D	D	VDD	VSS	0/0
1000	A	A	A	A	VREF+	VREF–	A	A	RA3	RA2	6/2
1001	D	D	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS	6/0
1010	D	D	A	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS	5/1
1011	D	D	A	A	VREF+	VREF–	A	A	RA3	RA2	4/2
1100	D	D	D	A	VREF+	VREF–	A	A	RA3	RA2	3/2
1101	D	D	D	D	VREF+	VREF–	A	A	RA3	RA2	2/2
1110	D	D	D	D	D	D	D	A	VDD	VSS	1/0
1111	D	D	D	D	VREF+	VREF–	D	A	RA3	RA2	1/2

A: ingresso analogico; D: ingresso digitale

Nota R: bit leggibile; W: bit scrivibile; 0,1,x: stato del bit dopo un reset.

Quando il processo di conversione è terminato, il modulo scrive il risultato a 10 bit nei registri ADRESH e ADRESL, mette a 0 il flag GO/$\overline{\text{DONE}}$ e il flag di interruzione ADIF, contenuto nel registro PIR1 (0CH), viene messo a 1.

La sequenza di programmazione del convertitore A/D è la seguente:

1. configurazione del modulo A/D:
   — configurazione dei pin analogici, della tensione di riferimento e dei segnali di I/O digitale (ADCON1),
   — selezione del canale analogico (ADCON0),
   — selezione del clock di conversione (ADCON0),
   — accensione del modulo (ADCON0);

2. configurazione dell'interruzione A/D (se è utilizzata):
   — azzeramento del bit ADIF,
   — abilitazione del flag ADIE,
   — abilitazione del flag GIE;
3. attesa della richiesta del programma di effettuare una conversione;
4. inizio della conversione portando il flag GO/$\overline{\text{DONE}}$ a 1 (ADCON);
5. attesa della fine della conversione (il flag GO/$\overline{\text{DONE}}$ va a 0 oppure si genera un'interruzione);
6. acquisizione del risultato della conversione e azzeramento del flag ADIF, se richiesto.

Per ulteriori conversioni si ripete la sequenza dal punto 1, se si vuole modificare la configurazione del sistema, o dal punto 2 se non si vuole modificare la configurazione ma solo ripetere la conversione. Fra due conversioni successive è necessario inserire un ritardo pari ad almeno due volte il tempo di conversione.

La ***figura 19.25*** mostra la curva di trasferimento del convertitore A/D.

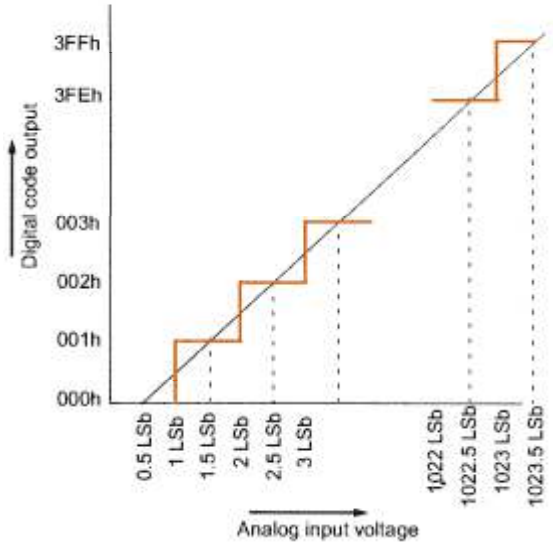


Fig. 19.25
Curva di trasferimento del convertitore A/D (*fonte*: Microchip).

PER FISSARE I CONCETTI

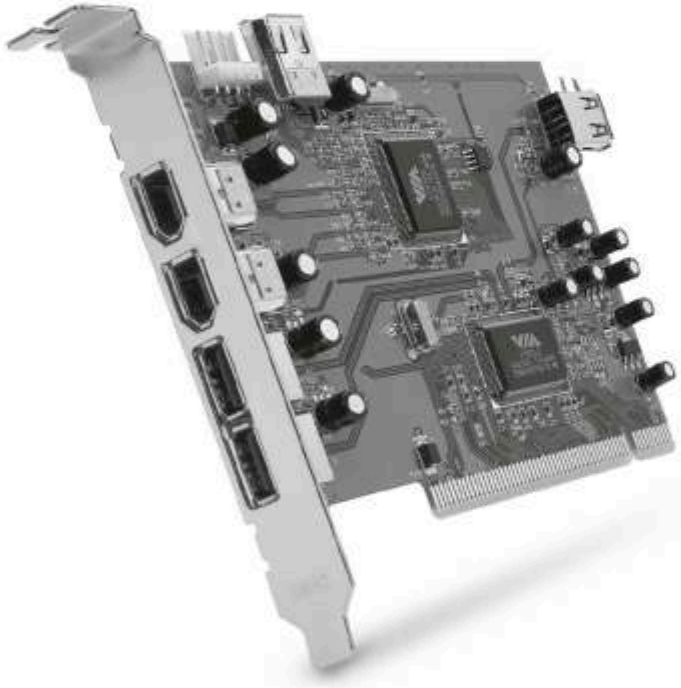
1. Come gestisce il microcalcolatore PIC16F628 un segnale PWM?
2. Che funzione ha il circuito power-on-reset?
3. Qual è la funzione del predivisore?
4. Quali sono le caratteristiche del convertitore analogico-digitale integrato nel microcalcolatore PIC16F877?
5. Di quante linee I/O dispone il PIC16F877? Sono tutte identiche? Descrivile.
6. Che differenza c'è tra una programmazione del microcontrollore del tipo HVP e del tipo LVP?

CAP 20 APPLICAZIONI DEI CIRCUITI DIGITALI

Applicazione 1: Interfaccia di ingresso/uscita per la porta parallela del PC IBM
Applicazione 2: Scheda di interfaccia
Applicazione 3: Acquisizione dati in multiplexer
Applicazione 4: Apparecchiatura di comando per uscite multiple

Concetti chiave

- Bounce
- Buffer
- Condizioni di sicurezza
- Condizioni ergonomiche
- Handshake
- Collaudo della scheda
- Connessione Darlington
- Progettazione modulare



SINTESI DEL MODULO K

CAPITOLO 18

Il **regolatore di intensità luminosa** è un classico circuito di controllo in corrente alternata utilizzato per adattare la luminosità emessa da una lampada in un ambiente mediante un comando, in genere manuale. La luminosità della lampada è controllata dalla corrente che circola nel filamento, per cui l'elemento di controllo deve poter regolare la corrente circolante da zero (lampada spenta) al valore massimo, che naturalmente dipende dalla potenza massima della lampada utilizzata. Il controllo è più efficace se viene realizzato con un Triac che può essere controllato sia nella semionda positiva sia in quella negativa.

La **sicurezza degli utilizzatori** di un'apparecchiatura elettronica è di fondamentale importanza.

Il circuito di regolazione di un carico interessato da tensioni e correnti elevate deve impiegare un circuito di disaccoppiamento che separi la parte di comando, che opera a bassa tensione (+ 12 V_{cc}), dalla parte del regolatore di potenza ad alta tensione (220 V_{ac}). Il disaccoppiamento circuitale può essere realizzato con un fotoaccoppiatore con uscita a Triac.

Il controllo della velocità del motore in corrente alternata monofase viene effettuato agendo sulla corrente di armatura mediante il **controllo dell'angolo di innesco** del Triac posto in serie al motore. Il controllo dell'angolo di innesco viene effettuato tramite una serie di impulsi generati con un **transistor unigiunzione**.

— Il circuito di comando non viene alimentato con una tensione continua ma con una **tensione pulsante** limitata da un diodo Zener. La tensione pulsante è necessaria per sincronizzare gli impulsi generati dal generatore con la tensione applicata sul Triac. Questa operazione di **sincronizzazione** degli impulsi di innesco è necessaria perché il Triac dev'essere innescato in ogni semionda con lo stesso spostamento di fase. Se ciò non avvenisse, la tensione e la corrente applicata al carico varierebbero nel tempo creando oscillazioni di velocità nella rotazione del motore (fenomeno del **pendolamento**).

— Il trasformatore d'impulsi ha un rapporto spire 1:1 ed è stato inserito nel circuito per ragioni di sicurezza, cioè per disaccoppiare il circuito di comando dalla tensione di rete e per far sì che gli organi di comando, in questo caso l'albero di regolazione del **potenziometro**, siano a bassa tensione (< 50 V).

CAPITOLO 19

I **microcalcolatori PIC** della Microchip sono microprocessori: a struttura Harvard e RISC. La **struttura Harvard** è caratterizzata dal mantenere i dati e i codici del programma memorizzati in due aree differenti. Le parole di codice sono lunghe da 12 a 14 bit, a seconda dei modelli, e sono scritte in una ROM interna non accessibile dall'esterno.

— Tutti i microcontrollori PIC sono programmabili con la tecnologia **In-Circuit Serial Programming**™, che permette di programmare, cancellare e riprogrammare il microcomputer senza doverlo estrarre dalla scheda applicativa.

— I criteri che un tecnico dovrebbe seguire per selezionare il microcalcolatore più adatto a una data apparecchiatura elettronica sono: il prezzo, la facilità d'uso, la disponibilità di note applicative, la configurazione e le prestazioni del microcalcolatore, la facilità di trasferire le conoscenze e le applicazioni dai microcontrollori più piccoli (a basso prezzo) ai più grandi (con prestazioni maggiori).

Per porre un PIC nel **modo programmazione** si può: applicare una tensione elevata (circa + 14 V) al terminale MCLR che, per questo impiego, è anche chiamato HVP; applicare un livello logico alto al terminale di abilitazione LVP (terminali RB3, RB4 o RB5 a seconda del tipo di PIC impiegato) durante un'operazione di reset. Tutti i microcalcolatori PIC supportano la modalità HVP e solo pochi, e più recenti, la modalità LVP.

Le principali caratteristiche del **microcontrollore PIC16F628** sono: memoria di programma Flash (2048 istruzioni), memoria dati RAM (224 byte), memoria EEPROM dati (128 byte), 2 port di I/O da 8 bit, 3 temporizzatori (a 8 e 16 bit), un modulo Capture/Compare/PWM, 2 comparatori analogici, 1 generatore di tensione di riferimento, 1 USART.

Il **contatore di programma** del PIC16F628 (PC, PCL e PCLATH) ha una lunghezza di 13 bit e il processore è in grado di gestire dati da 8 bit e indirizzi da 11 bit. Il contatore di programma è suddiviso in due parti: la parte bassa (gli 8 bit meno significativi) è contenuta nel registro PCL e la parte alta è accessibile solo indirettamente per mezzo del registro PCLATH.

— Il PIC16F628 prevede la possibilità dell'**indirizzamento indiretto** con l'uso di un registro virtuale (INDF) il cui indirizzo è ottenuto grazie al registro FSR e al bit IRP del registro STATUS.

Il PIC16F628 dispone di **2 port di ingresso e uscita**, *A* e *B*, che possono essere usati come linee di ingresso e di uscita digitali standard o come linee di ingresso e di uscita di periferiche speciali interne. Queste porte sono bidirezionali.

Il modulo **timer 0** è un contatore a 8 bit (TMR0), accessibile in lettura e in scrittura. Il segnale di clock che alimenta il contatore del timer 0 può essere interno o esterno al microcontrollore con l'intermediazione di un predivisore a 3 bit. Il modulo è composto da due comparatori analogici, alimentati dal port *A* e dalla tensione di riferimento interna.

— Il modulo **Capture/Compare/PWM** contiene un registro a 16 bit che può operare come registro di memorizzazione a 16 bit (Capture), come registro comparatore a 16 bit (Compare) o come generatore di un segnale PWM.

— Il **modulo PWM** è in grado di produrre un segnale di uscita con una risoluzione massima di 10 bit. Il segnale

PWM è un'onda quadra il cui duty-cicle viene regolato in funzione di un segnale modulante. Applicando il segnale PWM, opportunamente amplificato e condizionato, a un carico è possibile controllare il trasferimento di potenza.
La **configurazione** del PIC16F628 può essere fatta in molti modi differenti a seconda dei modi operativi: la riattivazione, procedura di uso interno per le funzioni di sistema o per l'utente, la generazione del segnale di clock, la temporizzazione, la sorveglianza sul corretto funzionamento del programma (**watchdog timer**), la sorveglianza della tensione di alimentazione, la programmazione ICSP, la protezione del codice.
— La **programmazione** del PIC16F628 consiste nel caricare il codice del programma nella memoria Flash e i dati nella memoria EEPROM dati. La tecnologia di queste memorie richiede una tensione elevata (circa 12 V) per la polarizzazione delle celle di memoria. Il microcalcolatore dispone di un circuito a pompa di carica che genera questa tensione. È anche possibile fornire questa tensione al componente dall'esterno (HVP).

Il **PIC16F877** è un microcalcolatore che permette di implementare applicazioni complesse. È incapsulato in un contenitore a 40 pin. Utilizza il set di istruzioni RISC, memoria di programma Flash, memoria dati (RAM), memoria dati EEPROM, 14 sorgenti di interruzione interne ed esterne, uno stack hardware a 8 livelli, In-circuit programming mediante 2 pin, 5 port I/O da 8 bit, 3 timer; 2 circuiti Capture/Compare/PWM, convertitore A/D a 10 bit con 8 canali multiplexati, porta seriale sincrona (SSP), USART/SCI, PSP con controllo esterno dei segnali di lettura, scrittura e selezione, circuiti POR, PWRT, OST.
— Il PIC16F877 è un componente che può realizzare tutte le applicazioni sviluppate dai processori meno potenti, utilizzando gli stessi registri e le stesse tecniche di programmazione, esiste cioè una **compatibilità software** verso il basso. La **compatibilità hardware** di un vecchio progetto dev'essere invece valutata controllando le condizioni di reset del processore ed eventuali interferenze con i dispositivi collegati ai terminali.

VERIFICHE

1.
Quali sono i criteri da seguire quando si seleziona un microcalcolatore destinato a un'apparecchiatura elettronica?

2.
Quali sono i metodi da seguire nella programmazione di un microcalcolatore PIC? Come si effettua la scelta della modalità di programmazione?

3.
Che cosa caratterizza un microcalcolatore RISC? Che cos'è la struttura Harward? Quali vantaggi offre?

4.
Quali periferiche caratterizzano il microcalcolatore PIC16F628? A che cosa servono? Fai almeno un esempio per ogni periferica.

5.
Come si programma il timer 2 del PIC16F628 per ottenere un segnale PWM?

6.
Quali sono le principali caratteristiche del PIC16F877?

7.
Come si utilizza il modulo convertitore analogico-digitale del microcalcolatore PIC16F877?

8.
Descrivi la funzione dei bit di start, di parità e di stop nella trasmissione seriale dei dati.

9.
Che cos'è un collegamento null modem? A che cosa serve?

MODULO L

Elettronica ed ecologia

CAP 21

RIFIUTI ELETTRONICI

Prerequisiti

- Elementi di base di diritto civile e amministrativo.
- Elementi di diritto comunitario, in particolar modo il significato e il campo di applicabilità dei pareri, delle raccomandazioni, delle decisioni, delle direttive e dei regolamenti.

Obiettivi

Conoscenze

- Riconoscere le implicazioni etico-sociali, scientifiche e ambientali dell'innovazione tecnologica in campo elettrico ed elettronico.
- Conoscere l'impatto ambientale dei materiali impiegati nel settore elettrico ed elettronico.

Competenze

- Saper valutare i rischi che i materiali utilizzati, e le varie soluzioni tecniche adottate, hanno per la tutela della persona, dell'ambiente e del territorio.
- Conoscere e applicare le principali normative a tutela della salute e dell'ambiente, con particolare attenzione per il settore elettrico ed elettronico.

CAP 21

Concetti chiave

- e-waste
- RAEE
- Comitato di vigilanza e di controllo
- Tracciabilità dei rifiuti speciali
- Direttiva RoHS

RIFIUTI ELETTRONICI

1 Sistema di gestione dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE)
2 Marcatura dei prodotti
3 Restrizioni all'uso di sostanze pericolose nella costruzione di vari tipi di apparecchiature elettriche ed elettroniche

Nel mondo sono sempre più diffusi gli apparecchi elettrici ed elettronici e, nell'ambito domestico, i prodotti elettronici multimediali, come schermi LCD ultrapiatti, lettori DVD e MP3, cellulari e smartphone, fotocamere digitali, e gli elettrodomestici: frigoriferi, lavatrici, lavastoviglie, piccoli elettrodomestici, condizionatori. Tutte queste apparecchiature sono, prima o poi, destinate a finire nella spazzatura perché non più funzionanti, o superate tecnologicamente oppure, più semplicemente, perché non più gradite a chi le possiede.

Per avere una dimensione di questo fenomeno si pensi che si producono rifiuti pari a 14 kg all'anno per abitante, con ritmi di crescita del 3-4%.

Attualmente il reimpiego di tali materiali si ferma a 1,15 kg per abitante (67.000 t), mentre l'obiettivo del legislatore è raggiungere i 4 kg entro il 2012, facendo uscire 240.000 t di rifiuti pericolosi dalle discariche tramite recupero, reimpiego o riciclo. Nel mondo i computer dismessi, già nel 1999, sono stati 40 milioni.

La quantità di rifiuti elettronici prodotti in Italia nel 2002, secondo le stime del Consorzio Ecoqual'It e dell'Osservatorio nazionale rifiuti, equivalgono a una collina composta da 50.000 t di materiale. Nel 2002 sul territorio della nostra penisola erano stati dismessi 12.000 t di monitor, 12.400 t di computer (personal computer, desktop e portatili, tastiere, mouse, modem), 1240 t di server e workstation, 900 t di scanner, 2610 t di stampanti, 13.800 t di fax, copiatrici e multifunzione, 4989 t fra toner per laser, ink jet e bubble jet. Cifre enormi.

Negli anni successivi le quantità di e-waste (*Waste of electric and electronic equipment*-WEEE) sono ulteriormente aumentate di un milione di tonnellate e di queste il 90% finisce in discarica.

Il solo incenerimento dei RAEE (Rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche) nell'Unione europea, secondo il WWF, emette nell'atmosfera circa 36 t di mercurio e 16 t di cadmio all'anno, senza parlare dell'emissione di diossine e altri agenti altamente nocivi. Per questo motivo, il problema dei rifiuti elettrici ed elettronici in Europa è stato affrontato da due normative specifiche che si basano sul principio di rendere responsabili i produttori e i rivenditori di materiale elettronico l'intero ciclo di vita dei loro prodotti, compreso lo smaltimento.

In Europa, come in ogni paese industrializzato, esistono leggi chiare e severe sullo smaltimento dei RAEE, perché questo tipo di rifiuti può essere molto pericoloso perché libera sostanze (in particolare piombo, cadmio, mercurio, cromo esavalente) ritenute nocive per l'ambiente e per la salute delle persone a causa della loro natura tossica, cancerogena e mutagena: tutte queste sostanze nocive si trovano in molti vecchi apparecchi elettronici che sono già finiti, o finiranno ben presto, nelle discariche o anco-

ra, nella peggiore delle ipotesi, che verranno dispersi nell'ambiente.

Con l'inizio del 2011, in Italia è finalmente partito un Sistema di gestione dei RAEE che prevede una raccolta capillare sul territorio mediante una logistica sicura e un riciclo ecocompatibile, permettendo così il recupero di tante risorse riutilizzabili (metalli ecc.) e la neutralizzazione delle sostanze tossiche (gas ozono lesivi ecc.). Il riciclo e il riuso dei RAEE non è esclusivamente un costo. Questi apparecchi sono infatti costituiti da materiali inquinanti ma in alcuni casi preziosi. Molti componenti sono realizzati in oro puro, recuperabile senza troppe difficoltà.

Le attività di trattamento prevedono varie fasi: messa in sicurezza o bonifiche, (ovvero l'asportazione dei componenti pericolosi); smontaggio dei sotto-assiemi e separazione preliminare dei materiali; lavorazione meccanica per il recupero dei materiali.

1 SISTEMA DI GESTIONE DEI RIFIUTI DI APPARECCHIATURE ELETTRICHE ED ELETTRONICHE (RAEE)

La normativa italiana sul nuovo Sistema di gestione dei RAEE è entrata in vigore dal 1° gennaio 2008.

Nella ***tabella 21.1*** sono richiamati i principali interventi legislativi e della Pubblica amministrazione, succedutisi nel tempo e attualmente in vigore, riguardanti la gestione dei rifiuti elettrici ed elettronici, mentre la ***tabella 21.2*** elenca le principali norme tecniche di riferimento.

Tabella 21.1 Principali interventi legislativi e della Pubblica amministrazione riguardanti la gestione dei rifiuti elettrici ed elettronici

DIRETTIVE COMUNITARIE RIGUARDANTI IL TRATTAMENTO RAEE
DIRETTIVE 2002/95/CE, 2002/96/CE, 2003/108/CE E 2006/66/CE

DECRETO LEGISLATIVO 25 LUGLIO 2005, N. 151 (pubblicato sul Supplemento ordinario n. 135 alla Gazzetta Ufficiale 29 luglio 2005 n. 175) recante "Attuazione delle direttive 2002/95/CE, 2002/96/CE e 2003/108/CE, relative alla riduzione dell'uso di sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche, nonché allo smaltimento dei rifiuti".
Il decreto si applica alle apparecchiature elettriche ed elettroniche (AEE) rientranti nelle categorie individuate nell'allegato 1A al decreto stesso e ai rifiuti da esse derivanti (RAEE).

CIRCOLARE DEL MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE DEL 23 GIUGNO 2006 (pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale 3 luglio 2006 n. 152) in materia di "Immissione sul mercato di apparecchiature elettriche ed elettroniche", di cui all'articolo 5 del D.Lgs 25 luglio 2005, n. 151.
La circolare fissa il termine del 1° luglio 2006 a partire dal quale è vietato commercializzare apparecchiature elettriche ed elettroniche (AEE) contenenti determinate sostanze pericolose.

DECRETO MINISTERIALE 25 SETTEMBRE 2007, N. 185 (pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale 5 novembre 2007, n. 257) che istituisce e stabilisce le modalità di funzionamento del registro nazionale dei soggetti obbligati al finanziamento dei sistemi di gestione dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE), nonché le modalità di costituzione e funzionamento di un centro di coordinamento per l'ottimizzazione delle attività di competenza dei sistemi collettivi e istituzione del comitato d'indirizzo sulla gestione dei RAEE, ai sensi degli articoli 13, comma 8, e 15, comma 4, del Decreto legislativo 25 luglio 2005, n. 151.

DECRETO MINISTERIALE 12 MAGGIO 2009 (pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale 2 luglio 2009, n 151) "Modalità di finanziamento della gestione dei rifiuti di apparecchiature di illuminazione da parte dei produttori delle stesse".
Questo decreto sancisce che gli apparecchi di illuminazione sono suddivisi in fasce legate al loro peso e aggiunge che: «I produttori di apparecchi di illuminazione comunicano al registro di cui all'art. 14 del Decreto legislativo n. 151 del 2005, entro sessanta giorni dalla data di entrata in vigore del presente decreto, la fascia o le fasce di appartenenza, indicando altresì, nel caso di appartenenza a più fasce, il numero di pezzi immessi sul mercato nazionale per ciascuna fascia. In sostanza, le imprese che hanno già comunicato il dato relativo ai pezzi e al peso complessivo devono fornire un ulteriore dettaglio suddividendo la quantità, espressa in pezzi, in tre fasce».

DECRETO DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI (DPCM) 17 dicembre 2008 (pubblicato sul Supplemento ordinario n. 278 alla Gazzetta Ufficiale - Serie generale n. 294) che stabilisce che:
• Sono tenuti alla presentazione della Sezione Produttori di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche tutti i soggetti identificati dall'art. 3 comma 1 lettera m) del D.Lgs. 151/2005.
• Inoltre nel caso in cui i produttori di apparecchiature elettriche ed elettroniche aderiscano a sistemi di gestione collettivi, tali sistemi possono comunicare, per conto dei produttori loro aderenti, i dati relativi al peso delle apparecchiature elettriche ed elettroniche raccolte attraverso tutti i canali, reimpiegate, riciclate e recuperate nell'anno solare precedente ai sensi dell'art 7 comma 3 del DM 185/2007.
• IL DPCM ha specificatamente previsto che i produttori di apparecchiature elettriche ed elettroniche di cui al decreto legislativo 25 luglio 2005, n. 151, entro il 30 aprile 2009, presentano la comunicazione AEE "scheda IMM AEE, apparecchiature elettriche ed elettroniche immesse sul mercato" sia per l'anno 2008, con riferimento alle AEE immesse sul mercato nell'anno 2007, sia per l'anno 2009, con riferimento alle AEE immesse sul mercato nell'anno 2008, compilando due schede distinte.
• Le informazioni anagrafiche e i soggetti aderenti al sistema collettivo non devono essere comunicate dai produttori ma dalla Camera di Commercio attraverso l'interconnessione telematica diretta tra il Registro e i sistemi informativi del Comitato di Vigilanza e Controllo e dell'APAT, a seguito delle disposizioni operative contenute nell'accordo stipulato da Unioncamere e ISPRA nel 2008.
Il DPCM individua e definisce il modello raccolta dati nonché le istruzioni per la presentazione.

LEGGE N. 13 DEL 27 FEBBRAIO 2009 (pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale 28 febbraio 2009, n. 49) "Conversione in legge, con modificazioni, del Decreto-legge 30 dicembre 2008, n. 208, recante misure straordinarie in materia di risorse idriche e di protezione dell'ambiente" ha disposto che: «Il modello unico di dichiarazione ambientale allegato al decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 2 dicembre 2008 sarà utilizzato, con le relative istruzioni, per le dichiarazioni da presentare, entro il 30 aprile 2010, con riferimento all'anno 2009, da parte dei soggetti interessati».

DECRETO-LEGGE 25 SETTEMBRE 2009, N. 135 Il Decreto stabilisce, all'articolo 5, comma 1 che: «Ai fini dell'elaborazione delle quote di mercato di cui all'articolo 15 del Decreto legislativo 25 luglio 2005, n. 151, nonché per consentire l'adempimento degli obblighi di comunicazione alla Commissione europea di cui all'articolo 17, comma 1, del medesimo decreto, entro il 31 dicembre 2009 i produttori di apparecchiature elettriche ed elettroniche comunicano al Registro nazionale dei soggetti obbligati al finanziamento dei sistemi di gestione dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche, con le modalità di cui all'articolo 3 del Decreto del ministro dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare 25 settembre 2007, n. 185, i dati relativi alle quantità e alle categorie di apparecchiature elettriche ed elettroniche immesse sul mercato negli anni 2007 e 2008. I medesimi produttori sono tenuti contestualmente a confermare o rettificare il dato relativo alle quantità e alle categorie di apparecchiature elettriche ed elettroniche immesse sul mercato nell'anno 2006 comunicato al Registro al momento dell'iscrizione».
Al comma 2 viene specificato che: «Per consentire l'adempimento degli obblighi di comunicazione alla Commissione europea di cui all'articolo 17, comma 1, del Decreto legislativo 25 luglio 2005, n. 151, i sistemi collettivi di gestione dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche o, nel caso di produttori di apparecchiature elettriche ed elettroniche professionali non aderenti a sistemi collettivi, i singoli produttori, comunicano entro il 31 dicembre 2009 al Registro nazionale dei soggetti obbligati al finanziamento dei sistemi di gestione dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche, con le modalità di cui all'articolo 3 del citato DM 185/2007, i dati relativi al peso delle apparecchiature elettriche ed elettroniche raccolte attraverso tutti i canali, reimpiegate, riciclate e recuperate nel 2008, suddivise secondo l'allegato 1 A del decreto legislativo 25 luglio 2005, n. 151, e per quanto riguarda la raccolta, in domestiche e professionali».

Tabella 21.2 Norme tecniche CEI per lo smaltimento delle apparecchiature elettroniche

NORMATIVA TECNICA	DESCRIZIONE
CEI 308-1	Scheda informativa per il fine-vita dei prodotti elettrici ed elettronici e guida alla compilazione
CEI 308-2	Gestione del fine-vita delle apparecchiature elettriche ed elettroniche provenienti da attività lavorative - Linee Guida
Procedura Eco&Tech, parte II	Requisiti di qualità del servizio di gestione rifiuti tecnologici di apparati della ET/HT in ambito ICT

Viene considerato produttore, a prescindere dalla tecnica di vendita utilizzata, compresi i mezzi di comunicazione a distanza:
— chi fabbrica e vende apparecchiature elettriche ed elettroniche recanti il suo marchio;
— chi rivende con il proprio marchio apparecchiature prodotte da altri fornitori; il rivenditore non è considerato "produttore" se l'apparecchiatura reca il marchio del produttore;
— chi importa o immette per primo, nel territorio nazionale, apparecchiature elettriche ed elettroniche nell'ambito di un'attività professionale e ne opera la commercializzazione, anche mediante vendita a distanza;
— chi produce apparecchiature elettriche ed elettroniche destinate esclusivamente all'esportazione.

Sono apparecchiature elettriche ed elettroniche, o AEE, le apparecchiature che dipendono, per un corretto funzionamento, da correnti elettriche o da campi elettromagnetici e le apparecchiature di generazione, di trasferimento e di misura di questi campi e correnti, appartenenti alle categorie:
— grandi elettrodomestici; piccoli elettrodomestici; apparecchiature informatiche e per telecomunicazioni; apparecchiature di consumo; apparecchiature di illuminazione;
— strumenti elettrici ed elettronici (a eccezione degli utensili industriali fissi di grandi dimensioni);
— giocattoli e apparecchiature per lo sport e per il tempo libero; dispositivi medici (a eccezione di tutti i prodotti impiantati e infetti); strumenti di monitoraggio e controllo; distributori automatici.

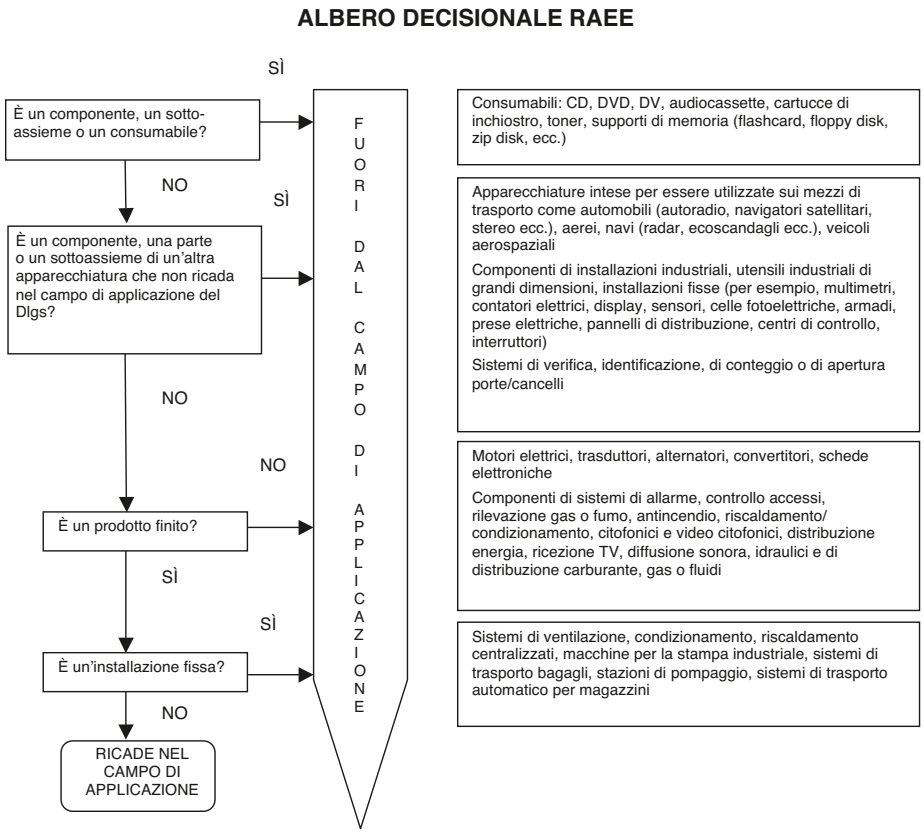
Tutti questi dispositivi sono progettati per essere alimentati con una tensione non superiore a 1000 volt per la corrente alternata e a 1500 volt per la corrente continua.

Sono considerati rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche, o RAEE, tutte le apparecchiature elencate sopra inclusi tutti i componenti, i sottoinsiemi e i materiali di consumo che sono parte integrante del prodotto nel momento in cui si assume la decisione di disfarsene.

Non ricadono nel campo di applicazione della normativa: gli utensili fissi industriali di grandi dimensioni; i mezzi di trasporto (auto, scooter, treni, aerei, navi), le installazioni fisse (installazioni industriali, sistemi centralizzati di condizionamento, celle frigorifere, sistemi distribuzione gas, carburante ecc.), gli impianti elettrici (citofonia, videocitofonia, sistemi di allarme, antincendio, rilevazione fumo e gas e ricezione TV ecc.).

Per decidere se un rifiuto ricade nella normativa è utile l'albero decisionale mostrato nella ***figura 21.1***.

Fig. 21.1
Albero decisionale per decidere se un rifiuto ricade nella normativa RAEE (fonte: Unioncamere).



I rifiuti RAEE sono distinti in varie tipologie: RAEE domestici, storici o nuovi, originati dai nuclei domestici; RAEE, storici o nuovi, di origine commerciale, industriale, istituzionale e di altro tipo analoghi, per natura e per quantità, a quelli originati dai nuclei domestici.

I RAEE storici sono quelli derivanti da apparecchiature elettriche ed elettroniche immesse sul mercato prima del 13 agosto 2005.

Il sistema di gestione delle apparecchiature elettriche ed elettroniche si fonda sul principio della responsabilità del produttore per i prodotti a fine vita.

Il finanziamento delle operazioni di trasporto dai centri di raccolta dei RAEE istituiti dai Comuni, agli impianti di trattamento, nonché delle operazioni di trattamento, di recupero e di smaltimento dal punto di vista ambientale compatibile dei RAEE storici, è a carico dei produttori presenti sul mercato. I costi di smaltimento si calcolano, in proporzione alla rispettiva quota di mercato, in base al numero di pezzi o a peso per il tipo di apparecchiatura prodotto, nell'anno solare di riferimento.

Per peso effettivo di un'apparecchiatura elettrica ed elettronica si intende il peso del prodotto, inclusi tutti gli accessori elettrici ed elettronici, al netto di imballaggi, manuali, batterie rimovibili e accessori non elettrici o elettronici.

I produttori adempiono al suddetto obbligo istituendo sistemi collettivi di gestione dei RAEE.

Al momento sono stati istituiti circa una quindicina di sistemi collettivi di finanziamento, articolati sotto forma di Consorzio o di Società.

In alcuni casi si tratta di sistemi rivolti a specifiche tipologie di prodotti (per esempio, apparecchi di illuminazione o condizionatori), in altri casi i consorzi si occupano di più tipologie (per esempio, grandi e piccoli elettrodomestici). I principali sistemi collettivi operanti in Italia sono elencati nella ***tabella 21.3***.

Tabella 21.3 Principali sistemi collettivi operanti in Italia (aggiornata al 2011)

SISTEMA COLLETTIVO	DESCRIZIONE
Consorzio Re.Media	Consorzio operante su tutte le categorie di prodotti previste dal decreto RAEE (D.Lgs 151/2005), sia domestici sia professionali (Freddo e clima, Grandi bianchi, TV e monitor, Sorgenti luminose)
Ecodom	Consorzio costituito dai principali produttori che operano nel mercato italiano dei grandi elettrodomestici (frigo, cottura, lavaggio, cappe e scaldacqua)
Ecoelit	Consorzio Nazionale Volontario Accumulatori ed Elettroutensili (tratta RAEE domestici e professionali)
Ecolamp	Consorzio per il recupero e lo smaltimento delle sorgenti luminose e degli apparecchi di illuminazione
Ecolight	Consorzio per la raccolta, il recupero e lo smaltimento dei RAEE domestici e professionali (Freddo e clima, Grandi bianchi, TV e monitor, Elettronica di consumo, Dispositivi medici, Distributori automatici, Sorgenti luminose)
Ecoped	Consorzio per il trattamento dei piccoli elettrodomestici
Ecor'It	Consorzio per la gestione di tutte le tipologie di RAEE
EcoSOL	Consorzio no profit trasversale su tutte le categorie di RAEE, professionali e domestiche
ERP Italia	European Recycling Platform è una società attiva già in altri Paesi UE per la gestione di tutte le tipologie di RAEE
RAEcycle S.C.p.A.	Società Consortile per Azioni senza scopo di lucro, che raggruppa oltre 750 produttori e che opera sull'intero territorio nazionale nei RAEE professionali e domestici (Freddo e clima, Grandi bianchi, TV e monitor, Sorgenti luminose)
Ridomus	Consorzio per il recupero e lo smaltimento di condizionatori, climatizzatori e deumidificatori a uso domestico

Il produttore può indicare esplicitamente all'acquirente, al momento della vendita di nuovi prodotti, i costi sostenuti per la raccolta, il trattamento, il recupero e lo smaltimento dei RAEE storici (*visible fee*). In tale caso, il distributore indica separatamente all'acquirente finale il prezzo del prodotto e il costo, identico a quello individuato dal produttore, per la gestione dei rifiuti storici.

La spesa per la gestione dei rifiuti è infatti girata ai consumatori, con importi che variano prevalentemente in base al peso. Il costo medio è di 3,5 centesimi di euro per kg. Per esempio, un frigorifero comporta un contributo di circa 13 €, un condizionatore di 4 €, un monitor di 3 €.

Nel caso in cui il produttore non sia stabilito sul territorio italiano, si iscrive al Registro attraverso un proprio rappresentante in Italia: l'iscrizione si effettua presso la Camera di commercio nella cui circoscrizione si trova la sede legale del rappresentante.

I produttori che forniscono apparecchiature elettriche ed elettroniche, avvalendosi dei mezzi di comunicazione a distanza (Internet, vendita per corrispondenza, vendite televisive ecc.), si conformano agli obblighi del Decreto legislativo 25 luglio 2005, n. 151 e a quelli dello Stato membro in cui risiede l'acquirente delle stesse. L'articolo 14 del D.Lgs n. 151/2005 prevede, al fine di controllare la gestione dei RAEE e di definire le quote di mercato in base alle quali gli oneri di gestione del sistema vengono ripartiti tra i produttori, l'istituzione, presso il ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare, del Registro nazionale dei soggetti tenuti al finanziamento dei sistemi di gestione dei RAEE. All'interno di tale registro è prevista una sezione relativa ai sistemi collettivi o misti istituiti per il finanziamento della gestione dei RAEE.

Il produttore di apparecchiature elettriche ed elettroniche, soggetto agli obblighi di finanziamento del sistema, può immettere sul mercato queste apparecchiature solo dopo aver effettuato l'iscrizione presso la Camera di commercio nella cui circoscrizione si trova la sede legale dell'impresa.

All'atto dell'iscrizione, il produttore deve indicare, qualora il codice di attività non individui esplicitamente la natura di produttore di RAEE, anche lo specifico codice di attività che lo individua come tale, nonché il sistema attraverso il quale intende adempiere agli obblighi di finanziamento della gestione dei RAEE previsti dal D.Lgs n. 151/2005.

Le tipologie di prodotti per i quali vi è l'obbligo di iscrizione sono: grandi elettrodomestici, piccoli elettrodomestici, apparecchiature informatiche per le comunicazioni, apparecchiature di consumo, apparecchiature di illuminazione, utensili elettrici ed elettronici, giocattoli e apparecchiature per il tempo libero e lo sport, dispositivi medici, strumenti di monitoraggio e di controllo e distributori automatici.

I compiti delle Camere di commercio sono stati definiti dal Decreto legislativo 25 luglio 2005, n. 151 nel quale si prevede:

— l'istituzione di una sottocategoria dell'Albo nazionale gestori relativa agli impianti che effettuano le operazioni di trattamento dei RAEE;
— i titolari degli impianti comunicano annualmente i dati relativi ai rifiuti trattati tramite una sezione speciali del Modello unico di dichiarazione;
— i produttori possono immettere sul mercato le apparecchiature elettriche ed elettroniche solo a seguito dell'**iscrizione al registro nazionale**, da effettuarsi presso la Camera di commercio di competenza;
— le Camere di commercio comunicano a un Comitato di vigilanza e di controllo, istituito presso il ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio, l'elenco delle imprese identificate come produttori di apparecchiature elettriche ed elettroniche sulla base dei codici di attività;
— il Comitato predispone e aggiorna il registro, sulla base delle comunicazioni delle Camere di commercio e raccoglie, esclusivamente in formato elettronico, i dati relativi ai prodotti immessi sul mercato.

L'iscrizione al Registro deve essere effettuata dalla sede legale del produttore presso la Camera di commercio di competenza esclusivamente per

via telematica. L'accesso al sistema telematico deve essere effettuato tramite firma digitale.

Il sistema di gestione dei RAEE prevede le seguenti sanzioni amministrative:

— il produttore che, senza avere provveduto all'iscrizione presso la Camera di commercio, immette sul mercato AEE, è punito con una sanzione pecuniaria da euro 30.000 a euro 100.000.
— il produttore che non comunica al Registro nazionale dei soggetti obbligati allo smaltimento dei RAEE le informazioni sui prodotti immessi annualmente sul mercato, oppure le comunica in modo incompleto o inesatto, è punito con una sanzione pecuniaria da euro 2000 a euro 20.000.

Tracciabilità dei rifiuti speciali

Da settembre 2011, su iniziativa del ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare nel più ampio quadro di innovazione e modernizzazione della Pubblica amministrazione, è entrato in vigore un nuovo sistema per il controllo elettronico della tracciabilità dei rifiuti speciali (SISTRI) e per quelli pericolosi su tutto il territorio nazionale e dei rifiuti urbani per la regione Campania.

Nell'ottica di controllare in modo più puntuale la movimentazione dei rifiuti speciali lungo tutta la filiera, viene pienamente ricondotto nel SISTRI il trasporto intermodale e posta particolare attenzione alla fase finale di smaltimento dei rifiuti, con l'utilizzo di sistemi elettronici in grado di dare visibilità al flusso in entrata e in uscita degli autoveicoli nelle discariche.

Il sistema si basa su **black box** e **chiavette elettroniche** che permetteranno di tenere costantemente sotto controllo il percorso compiuto dai rifiuti intercettando, praticamente in tempo reale, eventuali violazioni. Agli utenti del SISTRI vengono consegnati i seguenti dispositivi:

- **Un dispositivo elettronico per l'accesso in sicurezza** dalla propria postazione al sistema, definito dispositivo USB, idoneo a consentire la trasmissione dei dati, a firmare elettronicamente le informazioni fornite e a memorizzarle sul dispositivo stesso. Ciascun dispositivo USB può contenere fino a un massimo di tre certificati elettronici associati alle persone fisiche individuate, durante la procedura di iscrizione, come delegati per le procedure di gestione dei rifiuti. Tali certificati consentono l'identificazione univoca delle persone fisiche delegate e la generazione delle loro firme elettroniche ai sensi dell'art. 21 del D.Lgs. 7 marzo 2005, n. 82. Ciascun dispositivo USB contiene l'identificativo utente (username), la password per l'accesso al sistema, la password di sblocco del dispositivo (PIN) e il codice di sblocco personale (PUK).

- **Un dispositivo elettronico da installarsi su ciascun veicolo** che trasporta i rifiuti, definito black box, con la funzione di monitorare il percorso effettuato dall'automezzo. La consegna e l'installazione della black box avviene presso le officine autorizzate, il cui elenco è fornito contestualmente alla consegna del dispositivo USB e disponibile sul portale SISTRI.

- **Apparecchiature di sorveglianza** per monitorare l'ingresso e l'uscita degli automezzi dagli impianti di discarica.

La gestione del sistema è stata affidata al Comando Carabinieri per la Tutela dell'ambiente che da una sala di controllo monitora costantemente le aziende e i trasportatori. Le discariche sono monitorate da sistemi di videosorveglianza.

Il Sistema semplifica le procedure e gli adempimenti riducendo i costi sostenuti dalle imprese e gestisce in modo innovativo ed efficiente un processo complesso e variegato con garanzie di maggiore trasparenza, conoscenza e prevenzione dell'illegalità.

Da uno strumento cartaceo – imperniato sui tre documenti costituiti dal Formulario di identificazione dei rifiuti, dal Registro di carico e scarico e dal Modello unico di dichiarazione ambientale (MUD) – si passa a soluzioni tecnologiche avanzate in grado di semplificare gli adempimenti e di gestire efficacemente e in tempo reale tutta la filiera dei rifiuti.

2 MARCATURA DEI PRODOTTI

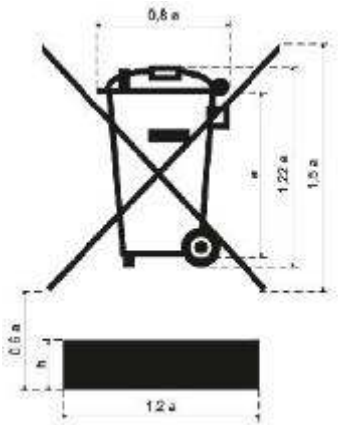


Fig. 21.2
Simbolo del cassonetto.

Le apparecchiature elettriche ed elettroniche, poste sul mercato a partire dalla data di entrata in vigore del Decreto che istituisce il Registro dei Produttori (20/11/2007), riportano, a cura e sotto la responsabilità del produttore, in modo chiaro, visibile e indelebile, il simbolo del cassonetto barrato, riportato all'Allegato 4 del D.Lgs n. 151/2005.

La norma CENELEC EN50419, sviluppata su mandato della Commissione, riporta il simbolo mostrato nella ***figura 21.2***. La dimensione minima del simbolo è 7 mm.

La ***figura 21.3*** mostra il tipo di informazioni che deve essere fornito dal produttore agli utenti dei prodotti di tipo domestico sul manuale di utilizzo dell'apparecchiatura.

Le leggi prevedono le seguenti sanzioni amministrative in caso di omissioni o di inerzia da parte del produttore:

— da euro 200 a euro 1000, per ciascuna apparecchiatura immessa sul mercato, per il produttore che non fornisce adeguata garanzia finanziaria;
— da euro 2000 a euro 5000 per il produttore che non fornisce ai consumatori, nelle istruzioni per l'uso di AEE, adeguate informazioni riguardanti lo smaltimento dell'apparecchiatura, gli effetti nocivi sull'ambiente e sulla salute umana dovuti alla presenza di sostanze pericolose nell'apparecchiatura, o un uso improprio della stessa;
— da euro 5000 a euro 30.000 per il produttore che, entro un anno dall'immissione sul mercato di ogni tipo di una nuova AEE, non fornisce le informazioni ai centri di trattamento e di riciclaggio;
— da euro 200 a euro 1000, per ciascuna apparecchiatura immessa sul mercato, per il produttore che non appone le marcature sul prodotto (il simbolo del cassonetto). La stessa sanzione viene applicata se il simbolo non è conforme a quello stabilito dalla norma.

Fig. 21.3
Modello di informazioni agli utenti dei prodotti di tipo domestico.

Modello di informazioni agli utenti dei prodotti di tipo "domestico"

INFORMAZIONE AGLI UTENTI

ai sensi dell'art. 13 del Decreto Legislativo 25 luglio 2005, n. 151 "Attuazione delle Direttive 2002/95/CE, 2002/96/CE e 2003/108/CE, relative alla riduzione dell'uso di sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche, nonché allo smaltimento dei rifiuti"

Il simbolo del cassonetto barrato riportato sull'apparecchiatura o sulla sua confezione indica che il prodotto alla fine della propria vita utile deve essere raccolto separatamente dagli altri rifiuti. L'utente dovrà, pertanto, conferire l'apparecchiatura giunta a fine vita agli idonei centri di raccolta differenziata dei rifiuti elettronici ed elettrotecnici, oppure riconsegnarla al rivenditore al momento dell'acquisto di una nuova apparecchiatura di tipo equivalente, in ragione di uno a uno. L'adeguata raccolta differenziata per l'avvio successivo dell'apparecchiatura dismessa al riciclaggio, al trattamento e allo smaltimento ambientalmente compatibile contribuisce ad evitare possibili effetti negativi sull'ambiente e sulla salute e favorisce il reimpiego e/o riciclo dei materiali di cui è composta l'apparecchiatura. Lo smaltimento abusivo del prodotto da parte dell'utente comporta l'applicazione delle sanzioni amministrative previste dalla normativa vigente.

3 RESTRIZIONI ALL'USO DI SOSTANZE PERICOLOSE NELLA COSTRUZIONE DI VARI TIPI DI APPARECCHIATURE ELETTRICHE ED ELETTRONICHE

Con la Direttiva RoHS (*Restriction of Hazardous Substances Directive*) 2002/95/CE, adottata nel febbraio del 2003, la Comunità europea ha imposto restrizioni sull'uso di determinate sostanze pericolose nella costruzione di vari tipi di apparecchiature elettriche ed elettroniche.

Questa norma è stata di riferimento alla Direttiva sulla rottamazione di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) 2002/96/CE che regola l'accumulazione, il riciclaggio e il recupero per le apparecchiature elettriche della quale si è ampiamente discusso nei paragrafi precedenti.

Questa direttiva è diventata obbligatoria dal 1° luglio 2006; non è una legge ma una direttiva. Non è quindi immediatamente operante in ogni paese, ma si deve attendere che ogni stato membro europeo la recepisca emettendo un provvedimento legislativo che si richiami alla direttiva stessa.

È pertanto possibile che ogni stato introduca, in fase legislativa, delle variazioni e che la stessa sia, di conseguenza, applicata in modi difformi.

La direttiva RoHS si applica ai prodotti costruiti o importati nell'Unione europea.

La RoHS è spesso chiamata direttiva *Pb-free* o *Lead-free* (cioè "esente da piombo") ma in realtà essa pone dei vincoli sull'uso di queste seguenti

sei sostanze: piombo, cadmio, mercurio, cromo esavalente (Cromo VI), bifenili polibromurati (PBB), etere di difenile polibromurato (PBDE).

Ognuna di tali sostanze è ampiamente utilizzata nell'industria elettrica ed elettronica; quando un'apparecchiatura diventa obsoleta lo smaltimento della stessa deve essere eseguito con ogni cautela.

Il **piombo** viene utilizzato nei processi di saldatura manuale e automatica dei circuiti stampati; in genere si usa un filo di saldatura (o un bagno) contenente una lega formata dal 40% piombo e 60% di stagno.

Il **mercurio** viene utilizzato in particolari termostati e nelle lampade a scarica.

Il **cadmio** viene utilizzato nelle batterie ricaricabili (batterie Nichel-cadmio), come protezione alla corrosione e usura di componenti metallici e come pigmento o stabilizzante nelle vernici.

Il **cromo esavalente** è l'elemento fondamentale del trattamento di cromatura e nella passivazione della zincatura elettrolitica, su componenti ferrosi e non ferrosi; entrambi i trattamenti vengono effettuati per evitare la corrosione e l'usura delle superfici (maniglie di contenitori metallici). Studi medici hanno già da tempo evidenziato l'alta pericolosità del cromo esavalente come agente cancerogeno.

I polimeri plastici utilizzano i **bifenili polibromurati** (PBB) e gli **eteri di difenile polibromurati** (PBDE) per ottenere proprietà ignifughe (rivestimenti dei cavi elettrici).

La Direttiva RoHS si applica a tutte le apparecchiature elencate nella Direttiva RAEE. Tale normativa, invece, non si applica alle batterie al piombo e al NiCd (anche se queste ultime sono state sostituite da batterie NiMH Nichel-Metallo Idruro), agli impianti e attrezzature industriali fissi, ai componenti ceramici, al vetro (usato in tubi a raggi catodici (CRT), in alcuni componenti elettronici e in tubi per lampade fluorescenti), a determinati tipi di lampade a basso contenuto di mercurio (5 mg), alle applicazioni nel settore automobilistico.

Tale normativa europea non è applicata in modo uniforme nei paesi extraeuropei. La Cina, per esempio, che è un grande produttore ed esportatore di apparecchiature elettriche ed elettroniche, ha una legislazione simile a quella europea, ma è molto vaga circa l'applicazione e le responsabilità. Il Giappone non ha una normativa specifica, mentre la California ha una legislazione simile a quella europea.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Che cosa significa e-Wastle?
2. Nel sistema di gestione dei RAEE chi viene considerato "produttore"?
3. Quali apparecchiature elettriche ed elettroniche sono soggette alla normativa per il riciclo?
4. Che cosa sono i sistemi collettivi di gestione dei RAEE?
5. Quali costi ha per l'acquirente lo smaltimento di un RAEE storico?
6. Chi ha la responsabilità dell'apposizione del marchio del cassonetto?
7. La direttiva RoHS ha limitato l'utilizzo del piombo, del cadmio, del mercurio e di altre sostanze largamente impiegate nella realizzazione dei dispositivi e delle apparecchiature elettriche ed elettroniche. Perché?
8. Le batterie sono interessate dalle norme previste dalla direttiva RoHS?

SINTESI DEL MODULO L

CAPITOLO 21

Il problema dei rifiuti elettrici ed elettronici in Europa è stato affrontato da due normative specifiche che si basano sul principio di rendere responsabili i produttori e i rivenditori di materiale elettronico di tutto il ciclo di vita dei loro prodotti, compreso lo smaltimento.

— I rifiuti elettrici ed elettronici possono essere molto pericolosi. Essi liberano sostanze ritenute nocive per l'ambiente e per la salute delle persone a causa della loro natura tossica, cancerogena e mutagena; in particolare lo sono il **piombo**, il **cadmio**, il **mercurio**, il **cromo esavalente**. Sono tutti elementi e sostanze che si trovano in molti vecchi apparecchi elettronici e che sono già finiti, o finiranno ben presto nelle discariche, o, nella peggiore delle ipotesi, verranno dispersi nell'ambiente.

— In Italia è finalmente è attivo un **Sistema di gestione dei RAEE** che prevede una raccolta capillare sul territorio mediante una logistica sicura e un riciclo ecocompatibile, che permette il recupero di tante risorse riutilizzabili (metalli ecc.) e la neutralizzazione delle sostanze tossiche (gas ozono lesivi ecc).

— Il riciclo e il riuso dei RAEE non è esclusivamente un costo. Questi apparecchi sono infatti costituiti da materiali inquinanti ma in alcuni casi preziosi. Molte componenti sono realizzate in oro puro, recuperabile senza troppe difficoltà.

— Il Sistema di gestione dei RAEE si fonda sul principio della responsabilità del produttore per i prodotti a fine vita. Il finanziamento delle operazioni di trasporto dai centri di raccolta dei RAEE, istituiti dai Comuni, agli impianti di trattamento, nonché delle operazioni di trattamento, di recupero e di smaltimento dal punto di vista ambientale compatibile dei RAEE storici è a carico dei produttori presenti sul mercato. I costi di smaltimento si calcolano, in proporzione alla rispettiva quota di mercato, in base al numero di pezzi o al peso per il tipo di apparecchiatura prodotti, nell'anno solare di riferimento.

— Nell'ottica di controllare in modo più puntuale la movimentazione dei rifiuti speciali lungo tutta la filiera, viene pienamente ricondotto nel **SISTRI** il trasporto intermodale e posta particolare attenzione alla fase finale di smaltimento dei rifiuti, con l'utilizzo di sistemi elettronici in grado di dare visibilità al flusso in entrata e in uscita degli autoveicoli nelle discariche.

— Il Sistema si basa su **black box** e **chiavette elettroniche** che permetteranno di tenere costantemente sotto controllo il percorso compiuto dai rifiuti intercettando, praticamente in tempo reale, eventuali violazioni.

Le apparecchiature elettriche ed elettroniche, poste sul mercato riportano, a cura e sotto la responsabilità del produttore, in modo chiaro, visibile e indelebile, il simbolo del cassonetto barrato.

La **Direttiva RoHS** (*Restriction of Hazardous Substances Directive*) 2002/95/CE emessa dalla Comunità europea ha imposto restrizioni sull'uso di determinate sostanze pericolose nella costruzione di vari tipi di apparecchiature elettriche ed elettroniche e si applica ai prodotti costruiti o importati nell'Unione europea.

— La RoHS è spesso chiamata direttiva *Pb-free* o *Lead-free* (cioè "esente da piombo") ma in realtà essa pone dei vincoli sull'uso di queste seguenti sei sostanze: piombo, cadmio, mercurio, cromo esavalente (Cromo VI), bifenili polibomurati (PBB), etere di difenile polibromurato (PBDE).

VERIFICHE

1.
Descrivi le dimensioni del problema creato dai rifiuti di natura elettrica ed elettronica.

2.
Che cosa significa la sigla RAEE?

3.
Il riciclo dei rifiuti RAEE è solo un costo?

4.
Chi finanzia le operazioni di trasporto dai centri di raccolta dei RAEE, istituiti dai comuni, agli impianti di trattamento?

5.
Il costo dello smaltimento di un RAEE storico deve essere pagato da .....

6.
Che cosa si intende per peso effettivo di un'apparecchiatura elettronica?

7.
Un venditore di apparecchiature elettroniche tramite siti Internet è soggetto alla normativa RAEE?

8.
Per poter immettere le apparecchiature elettriche ed elettroniche sul territorio nazionale, il produttore si deve iscrivere al registro nazionale RAEE presso .....

9.
La mancata iscrizione è soggetta a sanzione? Di che tipo?

10.
È stato istituito un sistema di tracciabilità dei rifiuti speciali denominato .....

11.
Come funziona il sistema di tracciabilità dei rifiuti speciali? A quale esigenza risponde?

12.
I prodotti soggetti alla normativa RAEE vengono individuati grazie a un marchio che ha la forma di .....

13.
La mancata apposizione del marchio è soggetta a sanzione? Di che tipo?

14.
Qual è l'oggetto della Direttiva comunitaria 2002/95/CE nota come direttiva RoHS?

15.
Perché la direttiva RoHS è nota come direttiva Pb-free o lead-free? Che impatto ha avuto nel mondo dell'elettronica?

MODULO M

Diritto del lavoro

CAP 22 CONTRATTI DI LAVORO

CAP 23 LO STATUTO DEI LAVORATORI (LEGGE 300/1970)

CAP 24 IL DIRITTO DI SCIOPERO

CAP 25 LA TUTELA PREVIDENZIALE DEI LAVORATORI

CAP 26 LA SICUREZZA SUL LAVORO

Prerequisiti

- Nozione di contratto e dei suoi elementi essenziali.
- Concetti di pericolo, rischio e danno ambientale.

Obiettivi

Conoscenze

- Essere consapevoli dei propri diritti e doveri di lavoratore.
- Conoscere gli obblighi delle figure preposte alla prevenzione.
- Conoscere e valutare i rischi legati agli eventi pericolosi: incendio, terremoto, esplosioni, nube tossica.

Competenze

- Saper valutare le varie tipologie di contratti di lavoro.
- Saper valutare e analizzare le situazioni di rischio negli ambienti di lavoro.
- Saper redigere un piano per la sicurezza.
- Saper effettuare un trattamento dati in accordo alla normativa sulla privacy.
- Saper redigere il documento programmatico per la sicurezza (DPS).

CAP 22

Concetti chiave

- Contratto di lavoro
- Lavoro a tempo indeterminato e determinato
- Contratti a progetto
- Lavoro interinale
- Lavoro a chiamata
- Part-time
- Collaborazione occasionale
- Apprendistato
- Stage

CONTRATTI DI LAVORO

Con l'entrata in vigore della Legge n. 30/2003, comunemente detta "Legge Biagi", sono state introdotte forme di impiego flessibili che hanno portato alla nascita di una decina di contratti di lavoro subordinato e parasubordinato (né dipendenti né autonomi) e alcuni casi di lavoro parasubordinato, formalmente autonomo, che nella realtà nasconde un lavoro dipendente.

I **principali tipi di contratti** sono: lavoro a tempo indeterminato, lavoro a tempo determinato (o a termine), lavoro part-time, lavoro stagionale, contratto di inserimento, apprendistato, lavoro interinale o a somministrazione, lavoro intermittente o a chiamata (job on call), stage o tirocinio, socio di cooperativa, coadiuvante familiare, collaborazione coordinata e continuativa (co.co.co.), lavoro a progetto (co.co.pro.), collaborazione occasionale, collaborazione con partita Iva.

Il lavoro subordinato prevede l'assoggettamento gerarchico, disciplinare e organizzativo del lavoratore al datore di lavoro. Il lavoratore è parte dell'organico aziendale, svolge la sua attività secondo un orario prestabilito utilizzando attrezzature e materiali forniti dal datore di lavoro.

Per la sua prestazione ha diritto a una retribuzione caratteristica per le mansioni attribuite, che comunque non può essere inferiore a quella prevista dal contratto nazionale di categoria cui appartiene.

La maggior parte dei contratti è a tempo indeterminato, sono però anche diffusi i contratti a tempo determinato e quelli parasubordinati sono in continuo aumento.

Oggigiorno più del 50% delle prime assunzioni (quelle dei giovani) avviene con contratti atipici (contratti a termine, stagionali, di inserimento, di somministrazione, cioè lavoratori in affitto o interinali, di collaborazione e di apprendistato).

Nella lettura migliore i contratti atipici o flessibili, compresi gli stage e i tirocini, sono diventati una forma di prova di lunga durata, durante la quale il datore di lavoro valuta il lavoratore prima di proporre un contratto a tempo indeterminato. Nella lettura peggiore sono, invece, dei contratti che permettono all'azienda di risparmiare sul costo del lavoro e di evitare alcune rigidità normative che caratterizzano i contratti a tempo indeterminato. Quest'ultima strada è percorsa principalmente da aziende del settore dei servizi e da altre che non necessitano di personale qualificato e fedele all'azienda. I contratti atipici permettono all'azienda di effettuare notevoli risparmi soprattutto dal punto di vista previdenziale.

Il contratto a tempo indeterminato

Il lavoro a tempo indeterminato è il contratto normale previsto dalla Legge n. 247/2007. Il contratto prevede un periodo di prova, definito dal contratto collettivo nazionale, non superiore a 6 mesi (3 per gli impiegati). Il contratto può essere interrotto durante il periodo o alla sua scadenza (anche verbalmente) senza preavviso e senza il pagamento di indennità al lavoratore.

Il lavoratore ha diritto di conoscere le mansioni per le quali è stato assunto. Le mansioni potranno variare successivamente, ma la retribuzione non può diminuire. Le mansioni possono essere peggiorate solo con il consenso del lavoratore, mentre in caso di promozione a compiti supe-

riori ha diritto all'adeguamento della retribuzione. Un lavoratore può essere trasferito per comprovate ragioni tecniche, organizzative e produttive (art. 2103 Codice civile). Il lavoratore non può rifiutare il trasferimento, può peraltro ricorrere al giudice.

Il datore di lavoro che dispone trasferimenti temporanei dei lavoratori (trasferte o missioni) deve corrispondere, di norma, un'indennità specifica e il rimborso delle spese sostenute e opportunamente documentate.

Il datore di lavoro può disporre anche un distacco: può, cioè, temporaneamente, per soddisfare un proprio interesse, mettere il lavoratore a disposizione di un altro soggetto (art. 30 Legge Biagi) per l'esecuzione di una certa prestazione lavorativa.

I periodi di malattia del lavoratore costituiscono un motivo di assenza giustificata per cui egli conserva il diritto al posto entro i limiti stabiliti dal contratto collettivo; nel periodo di malattia riceve un trattamento economico sostitutivo della retribuzione. Quando si ammala ha l'obbligo di inviare all'azienda il certificato medico attestante il periodo di malattia redatto dal medico curante (oggi l'invio avviene per via telematica da parte del medico); nel periodo di malattia è soggetto a visita medica di controllo, richiesta dal datore di lavoro o dall'Inps e ha l'obbligo, pena la decadenza dal trattamento economico, di essere reperibile presso il domicilio dichiarato o in specifiche fasce orarie della giornata: dalle ore 10.00 alle ore 12.00 e dalle ore 17.00 alle ore 19.00. Per il pubblico impiego le fasce orarie sono state recentemente modificate: dalle ore 9.00 alle ore 13.00 e dalle ore 15.00 alle ore 18.00.

Il lavoratore ha diritto alle ferie retribuite, tale diritto è sancito dalla Costituzione (art. 36) e dall'art. 2109 del Codice civile. Il periodo di ferie non può essere inferiore a quattro settimane (DL 213/2004) e per almeno due settimane consecutive in caso di richiesta del lavoratore nel corso dell'anno di maturazione e per le restanti due settimane nei 18 mesi successivi al termine dell'anno di maturazione.

I contratti collettivi possono solo aumentare il periodo minimo di quattro settimane di ferie ed esse non possono essere sostituite da un'indennità monetaria se non nel caso di risoluzione del rapporto di lavoro.

Le ferie vengono retribuite con una cifra identica a quella erogata nel caso che il lavoratore abbia lavorato.

Si ribadisce che tutti i lavoratori, indipendentemente dal tipo di contratto applicato, qualifica o mansione, hanno diritto a quattro settimane di ferie. Le ferie si maturano anche durante le assenze per malattia, per congedi di maternità (o paternità), per congedo matrimoniale, per infortunio sul lavoro, per servizio ai seggi elettorali.

Il contratto determinato (o a termine)

Il lavoro a tempo determinato (o a termine) è un contratto che pone un termine alla durata del contratto stesso. Si può applicare per ragioni di carattere tecnico, produttivo, organizzativo o sostitutivo riferibile anche all'ordinaria attività del datore di lavoro (DL 368/2001). Il contratto prevede la forma scritta, la data di scadenza deve essere esplicitamente dichiarata e motivata (non basta il rinvio alla legge), per esempio la necessità di far fronte a una commessa imprevista, l'utilizzo di una professionalità non presente in azienda, la sostituzione di personale in ferie, in congedo di maternità o in malattia.

Il contratto a tempo determinato non può durare oltre 3 anni (36 mesi), indipendentemente da eventuali periodi di interruzione fra contratti successivi (per i dirigenti il tetto è di 5 anni). Trascorsa la durata massima è consentita una sola proroga per ragioni obiettive e per la stessa attività lavorativa. Devono passare almeno 10 giorni tra un contratto e quello successivo se il contratto non è superiore a sei mesi e 20 giorni se è per periodi più lunghi, altrimenti il rapporto può essere trasformato dal giudice a tempo indeterminato.

Un lavoratore con contratto a tempo determinato, che ha lavorato per più di sei mesi, ha diritto di precedenza nelle assunzioni a tempo indeterminato effettuate dallo stesso datore di lavoro nei dodici mesi successivi per le stesse mansioni già espletate.

Le aziende che sono ricorse alla cassa integrazione guadagni o altri tipi di ammortizzatori sociali, o che hanno licenziato del personale non possono assumere altri lavoratori per le stesse mansioni. Ovviamente non si possono utilizzare lavoratori a tempo determinato per sostituire lavoratori in sciopero.

Il lavoro part-time

I contratti di lavoro prevedono anche la possibilità di stipulare contratti a tempo parziale (part-time) per un numero di ore di lavoro inferiore a quello stabilito nei contratti di lavoro nazionali. Il part-time può essere orizzontale o verticale.

Il contratto **part-time orizzontale** prevede una ridotta attività lavorativa per tutti i giorni della settimana, mentre il **part-time verticale** prevede lavoro a tempo pieno ma solo per alcune giornate della settimana (per esempio due giorni su cinque), del mese o dell'anno.

I contratti possono anche essere misti. La durata e il tipo di contratto devono essere esplicitamente indicati nel contratto sottoscritto dalle parti.

L'eventuale lavoro supplementare (straordinario) rispetto all'orario concordato deve essere giustificato da precise esigenze produttive e il lavoratore deve essere consenziente.

Il lavoro interinale o in somministrazione

Il **lavoro interinale** o **in somministrazione** è regolato dalla già citata Legge Biagi e dalla Finanziaria 2010. Questo tipo di contratto viene utilizzato quando un'azienda, dovendo svolgere un determinato lavoro, non si avvale del proprio personale dipendente ma utilizza lavoratori presi "in affitto" da agenzie specializzate e autorizzate dal ministero del Lavoro.

I lavoratori sono, quindi, dipendenti dell'agenzia che prestano la loro opera presso l'azienda richiedente con cui l'agenzia ha stipulato un contratto di fornitura. Il rapporto di lavoro può essere a tempo determinato (forma più frequente) o a tempo indeterminato. Il lavoratore, nell'espletare la sua collaborazione, pur essendo dipendente dell'agenzia, è sottoposto al potere di direzione e di controllo dell'azienda presso la quale presta la sua attività. Questo contratto offre all'azienda la possibilità di utilizzare lavoratori senza averli alle proprie dipendenze e al lavoratore lo status di dipendente (dell'agenzia) e quindi di usufruire dell'applicazione del relativo contratto di lavoro e delle connesse garanzie.

Il contratto interinale segue le regole generali già descritte per il con-

tratto a tempo determinato. Non può essere utilizzato se l'impresa nella quale il lavoratore deve prestare la sua opera non ha fatto la valutazione dei rischi ai sensi della legge sulla sicurezza del lavoro. Nel caso in cui l'agenzia non corrisponda al lavoratore la retribuzione prevista, l'onere deve essere assunto dall'impresa che, poi, potrà rivalersi sull'agenzia.

Il contratto di somministrazione a tempo indeterminato, detto di *staff-leasing*, consente all'impresa di esternalizzare moltissime delle attività interne, come la consulenza e assistenza informatica; i servizi di custodia e pulizia; il trasporto di macchinari e merci a e dall'impresa; la gestione, ricerca e selezione del personale; il marketing; la gestione di call-center ecc.

L'apprendistato

L'**apprendistato** è un contratto antico che viene al giorno d'oggi rilanciato per avvicinare il mondo della scuola a quello del lavoro. Il datore di lavoro che si avvale di questa tipologia contrattuale deve fornire al giovane, nell'azienda e fuori da essa, non solo il lavoro ma anche gli insegnamenti che gli consentono di conseguire una qualifica professionale.

Sono previsti tre tipi di apprendistato.

1. **Per l'espletamento del diritto-dovere di istruzione e formazione.** Può essere stipulato da giovani di età compresa fra i 16 e i 18 anni non compiuti che debbano completare il percorso formativo. Questo contratto può durare al massimo 3 anni ed è finalizzato al conseguimento di una qualifica professionale o di un titolo di studio. L'apprendistato può costituire titolo di credito per il proseguimento dei percorsi di istruzione e formazione. La qualifica che dovrà essere raggiunta dall'apprendista deve essere indicata nel contratto di lavoro. È prevista la figura del tutor aziendale che deve seguire l'iter formativo dell'apprendista.
2. **Apprendistato professionalizzante.** Questo tipo di apprendistato riguarda i maggiorenni di età compresa fra i 18 e i 29 anni. Il contratto non può durare più di 6 anni e deve prevedere il piano formativo individuale e la qualifica che sarà raggiunta. È prevista la figura del tutor aziendale che deve seguire l'iter formativo dell'apprendista, che non può essere inferiore a 120 ore.
3. **Per l'acquisizione di un diploma o per percorsi di alta formazione.** Come il precedente, questa forma di apprendistato riguarda i maggiorenni di età compresa fra i 18 e i 29 anni già in possesso di un diploma di scuola secondaria superiore e che devono puntare a un livello scolastico superiore (universitario o scuola di alta formazione, per esempio IFTS-Istruzione e Formazione Tecnica Superiore). Non è prevista una durata massima, e anche in questo caso il contratto deve essere integrato da un piano individuale.

Il contratto di inserimento

Il **contratto di inserimento** ha sostituito i precedenti contratti di formazione lavoro e non è più diretto alla sola formazione dei giovani. Può essere applicato, oltre che ai giovani di età compresa fra i 18 e i 29 anni, anche ai disoccupati di lunga durata con età compresa tra i 29 e i 32 anni, ai disoccupati con più di 50 anni di età, ai lavoratori che sono disoccupati da almeno 2 anni, alle donne che risiedono in aree con forte disoccupazione femminile e ai portatori di handicap.

Il lavoro a progetto

Il **lavoro a progetto**, introdotto dalla Legge Biagi, tende a correggere l'abuso dei contratti di collaborazione coordinata continuativa (co.co.co.) che simulavano in molti casi il rapporto dipendente, che avrebbe richiesto un contratto di lavoro a tempo indeterminato, con contratti di collaborazione.

Il contratto a progetto prevede l'indicazione del progetto, cioè un'attività produttiva ben individuabile e determinabile nella prestazione lavorativa e collegabile con un risultato finale. Il lavoratore deve poter svolgere la sua attività in modo autonomo seppure in collaborazione con il committente.

Il contratto deve avere forma scritta e deve indicare la durata determinata o determinabile della prestazione lavorativa, il progetto o il programma da realizzare e il corrispettivo che deve essere allineato alle retribuzioni analoghe.

Il lavoratore a progetto non è tenuto all'esclusiva ma può stipulare anche altri contratti, l'unico divieto è quello della non concorrenza, cioè non può lavorare per aziende in concorrenza con l'azienda con cui collabora.

Durante i periodi malattia il rapporto di lavoro viene sospeso, ma se la sospensione si prolunga oltre un sesto del tempo previsto per la durata nel contratto, questi può essere rescisso dal committente. Se il programma o il progetto risulta simulato, il giudice può trasformare il contratto in un rapporto di lavoro subordinato.

Questo tipo di contratto può essere stipulato anche da un lavoratore autonomo, titolare di partita Iva, purché l'attività del progetto non costituisca l'ordinaria attività svolta professionalmente.

Il lavoro accessorio

Il **lavoro accessorio** è una particolare modalità di prestazione lavorativa occasionale che può essere svolto da pensionati, da studenti (nei periodi di vacanza, il sabato e la domenica), da studenti universitari con meno di 25 anni, disoccupati, cassintegrati, lavoratori in mobilità, casalinghe. Il compenso per la prestazione non deve essere superiore a 5000 euro netti l'anno per ciascun committente (3000 euro se il lavoratore è titolare di forme di sostegno al reddito).

Le attività che possono essere svolte sono: piccoli lavori domestici, baby sitter, cura degli anziani, giardinaggio, lezioni private, pulizia, collaborazioni con maneggi e scuderie, vendemmia, raccolta di pomodori, collaborazioni con associazioni di volontariato, consegna porta a porta e vendita ambulante di stampa quotidiana e periodica.

La retribuzione viene effettuata tramite voucher (buoni) che i datori di lavoro acquistano presso l'Inps, telematicamente o in tabaccheria, in blocchetti da 10 euro ciascuno.

Il lavoratore, successivamente, cambia il buono in denaro presso gli stessi emittenti, incassando 7,5 euro a buono. Gli altri 2,5 euro vengono trattenuti dall'amministrazione a titolo di contributi previdenziali e assicurazione contro gli infortuni.

Il lavoro a intermittenza o a chiamata (job on call)

Il lavoro a intermittenza o a chiamata (job on call) può essere stipulato solo per brevi periodi e in forma intermittente, su richiesta del datore di lavoro e deve essere richiesto almeno con un giorno di preavviso.

Se il lavoratore ha scelto di essere vincolato alla chiamata del datore di lavoro, oltre alla retribuzione prevista, il datore deve corrispondere un'indennità di disponibilità che non può essere inferiore al 20% delle retribuzione mensile. La durata della prestazione e la forma della chiamata devono essere precisate in forma scritta nel contratto.

Il rifiuto ingiustificato di rispondere alla chiamata da parte del lavoratore che ha scelto di essere vincolato alla chiamata del datore di lavoro, può essere causa la risoluzione del contratto.

Questo tipo di contratto non può essere utilizzato per sostituire lavoratori in sciopero, né da aziende che abbiano operato licenziamenti collettivi nei sei mesi precedenti, o che stiano utilizzando la cassa integrazione o altri tipi di ammortizzatori sociali.

Il tirocinio formativo o stage

Questo tipo di contratto presuppone una convenzione tra un ente formatore e un'azienda pubblica o privata che offre al lavoratore un periodo di tirocinio formativo o stage.

Possono usufruirne i giovani che abbiano assolto l'obbligo scolastico. Non è un rapporto di lavoro: non c'è, quindi, l'obbligo di retribuzione, ma solo un congruo rimborso spese. Sussiste invece l'obbligo di assicurazione contro gli infortuni sul lavoro.

Per quanto attiene la durata massima, la legge fissa il limite in 4 mesi per gli studenti della scuola secondaria superiore, in 6 mesi per gli allievi di istituti professionali, di corsi di formazione professionale, di attività formative postdiploma o postlaurea e per i disoccupati/inoccupati, in 12 mesi per gli studenti universitari e per i soggetti svantaggiati e in 24 mesi per i portatori di handicap.

Il tirocinio formativo deve prevedere la nomina di un tutore che seguirà il giovane per tutta la durata dell'attività.

Lo stagista (o tirocinante) non può ricoprire mansioni che dovrebbero spettare al personale dipendente e non gli possono essere imposti obblighi di orario.

Il socio lavoratore

È il caso di un socio di una cooperativa che presta il proprio lavoro per la stessa cooperativa. Il rapporto di lavoro è determinato dal regolamento che le cooperative devono depositare presso la Direzione provinciale del lavoro. Se manca il regolamento, il rapporto di lavoro è del tipo subordinato.

La retribuzione del socio non può, comunque, essere inferiore a quella prevista dai contratti nazionali di categoria di appartenenza della cooperativa (commercio ecc.). Al socio lavoratore non si applicano le tutele previste dall'art. 18 (Reintegrazione nel posto di lavoro) dello Statuto dei lavoratori, perché con il licenziamento viene meno anche il rapporto associativo, quindi, il socio licenziato senza giusta causa o giustificato motivo non può richiedere il reintegro.

Associati in partecipazione

È una forma di lavoro che, purtroppo, talvolta nasconde un rapporto subordinato. Questo tipo di contratto è normato dall'art. 2549 del Codice civile, che prevede che l'imprenditore (associante) attribuisca al lavorato-

re (associato) una partecipazione agli utili della sua impresa in cambio della prestazione lavorativa. La retribuzione viene, così, a dipendere dagli utili aziendali e, inoltre, il lavoratore assume anche il rischio di impresa e deve rispondere anche delle eventuali perdite (salvo che nei patti sottoscritti si sia disposto diversamente). Il reddito corrisposto al lavoratore è parificato a quello di un lavoratore autonomo. Dal punto di vista giuridico non vi può essere un rapporto subordinato fra associante e associato, se così non è, l'associato può richiedere al giudice la trasformazione del contratto in rapporto subordinato.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Elenca i principali tipi di contratti.
2. Quali sono le principali caratteristiche del contratto a tempo indeterminato?
3. Quali sono gli elementi essenziali di un contratto a tempo determinato?
4. Quali sono le caratteristiche del contratto part-time?
5. Quali sono le caratteristiche del contratto di apprendistato?
6. Quando è opportuno stipulare un contratto di inserimento?
7. Quali sono le caratteristiche di un lavoro a progetto? Si può lavorare per più di un'azienda? Se sì, a quale condizione?
8. Che cos'è un tirocinio formativo?

CAP 23 LO STATUTO DEI LAVORATORI (LEGGE 300/1970)

Concetti chiave

- Tutela dei lavoratori
- Sanzioni disciplinari
- Studenti lavoratori
- Libertà sindacale
- Attività sindacale
- Diritto di assemblea

Lo Statuto dei lavoratori è una legge promulgata dal parlamento nel 1970, composta da 41 articoli, che si occupa di tutelare la **libertà** e la **dignità del lavoratore**, della libertà sindacale e dell'attività sindacale.

L'impianto della legge negli anni è rimasto immutato, ma ha subito modifiche anche significative a opera di leggi successive, del referendum del 1995 e della giurisprudenza.

I lavoratori, senza distinzione di opinioni politiche, sindacali e di fede religiosa, hanno diritto, nei luoghi ove prestano la loro opera, di manifestare liberamente il proprio pensiero (art. 1).

Il datore di lavoro non può, ai fini dell'assunzione, e durante il rapporto di lavoro, effettuare indagini, anche a mezzo di terzi, sulle opinioni politiche, religiose e sindacali del lavoratore e su fatti non rilevanti ai fini della valutazione dell'attitudine professionale del lavoratore (art. 8).

Il lavoratore deve essere valutato per come lavora non per ciò che crede o pensa.

Nei luoghi di lavoro si possono contestare al dipendente solo azioni o fatti che attengono alla tutela del patrimonio aziendale. Le indagini a questo scopo non possono essere effettuate mediante guardie giurate, né con mezzi elettronici (sistemi audiovisivi) o con altre apparecchiature di controllo a distanza. Le apparecchiature possono essere impiegate solo per scopi diversi, quali la sicurezza e, se è possibile che possano essere utilizzate per controllare i lavoratori, possono essere installate solo con un accordo delle rappresentanze sindacali aziendali, o in mancanza di intesa, con istanza all'Ispettorato del lavoro.

Le innovazioni tecnologiche, l'estensione dell'uso delle reti di calcolatori nelle aziende e il diffuso utilizzo della navigazione in rete e delle comunità virtuali (Facebook, Twitter ecc.) hanno creato nelle imprese problemi di gestione difficilmente immaginabili al tempo della stesura dello Statuto.

La giurisprudenza e la Risoluzione del Garante della Privacy n.13 del 1° marzo 2007 hanno ribadito che il datore di lavoro non può entrare negli ambiti che riguardano la sfera personale del lavoratore.

Il datore può installare sistemi tecnici che possano prevenire l'utilizzo non autorizzato degli strumenti informatici da parte del dipendente e può anche effettuare controlli generali in forma anonima, ma non può scendere al livello individuale. Sono quindi illegittimi i sistemi che permettono il controllo della navigazione in Internet e delle e-mail di un dipendente.

Esistono strumenti software che possono filtrare e controllare il traffico in uscita. La funzione si chiama Data Loss Prevention ed è attivabile nei firewall. Nella posta elettronica si può preventivamente configurare il programma gestore (Exchange, Outlook ecc.) in modo che non si possano allegare ai messaggi file superiori a certe dimensioni, prevenendo così la trasmissione di alte quantità di dati riservati, oppure non consentire affatto allegati dalle e-mail personali; ed è possibile creare utenze "lavorative" non personali che, appunto, avranno una gestione condivisa, impedendo così al lavoratore malintenzionato di usarla per i propri scopi.

La tutela della salute

Nell'articolo 5 lo Statuto si occupa della tutela della salute dei lavoratori. Il datore di lavoro ha la facoltà di far controllare l'idoneità fisica del lavo-

ratore da parte di enti pubblici o da istituti specializzati di diritto pubblico. L'azienda in caso di malattia o di infortunio di un dipendente deve sempre servirsi per gli accertamenti e i controlli medici dei servizi ispettivi degli istituti previdenziali competenti e, comunque, delle strutture pubbliche.

Le ispezioni personali di controllo dei lavoratori sono vietate a eccezione dei casi in cui siano indispensabili per salvaguardare il patrimonio aziendale (qualità dei prodotti, materie prime, strumenti di lavoro).

Le rappresentanze sindacali aziendali hanno il diritto di controllare l'applicazione delle norme per la prevenzione degli infortuni e delle malattie professionali e di promuovere la ricerca, l'elaborazione e l'attuazione di tutte le misure idonee a tutelare la salute e l'integrità fisica dei lavoratori. A tal fine il D.Lgs n. 626/1994, in materia di sicurezza sul lavoro, prevede la possibilità di sottoporre a visite periodiche il personale dipendente esposto al rischio di malattie professionali. Tali visite sono affidate a medici specializzati in medicina del lavoro incaricati dal datore di lavoro. Per esempio gli impiegati di un ufficio ove si utilizzano per molte ore terminali vengono sottoposti a periodiche visite oculistiche.

Il sistema delle sanzioni disciplinari

Un datore di lavoro può sanzionare un dipendente soltanto se vengono rigorosamente rispettate le procedure definite nello Statuto, non sono possibili provvedimenti discrezionali.

Le sanzioni devono essere poste in relazione alle infrazioni e per poterle applicare devono essere seguite precise procedure di contestazione. Tali contestazioni devono essere portate a conoscenza del lavoratore mediante affissione in un luogo accessibile a tutti.

Nessun provvedimento disciplinare può essere adottato nei confronti del lavoratore senza aver prima sentito la sua difesa. Il lavoratore può farsi assistere da un rappresentante dell'associazione sindacale cui appartiene o conferisce mandato.

I provvedimenti più gravi dell'avvertimento verbale non possono essere applicati prima che siano trascorsi cinque giorni dalla contestazione per iscritto del fatto.

Il lavoratore può ricorrere contro le sanzioni disciplinari presso l'autorità giudiziaria o ricorrere a un collegio di conciliazione e arbitrato, composto da un rappresentante di ciascuna delle parti e da un terzo membro scelto di comune accordo, nominato dal direttore dell'Ufficio del lavoro.

Gli studenti lavoratori

Gli studenti lavoratori hanno diritto a turni di lavoro che agevolino la frequenza dei corsi e la preparazione agli esami e non sono obbligati alle prestazioni di lavoro straordinario o durante i riposi settimanali. Durante le prove di esame hanno diritto a permessi retribuiti.

Le mansioni del lavoratore

Il lavoratore deve essere adibito alle mansioni per le quali è stato assunto, o a quelle corrispondenti alla categoria superiore che abbia successivamente acquisito, o equivalenti alle ultime effettivamente svolte, senza alcuna diminuzione della retribuzione. Se il lavoratore viene assegnato a mansioni superiori ha diritto a un trattamento economico corrispondente

all'attività svolta e le nuove mansioni diventano definitive dopo un periodo prefissato dai contratti collettivi e comunque non superiore a tre mesi; questa disposizione non è applicabile se il posto è occupato in sostituzione di un lavoratore assente con diritto alla conservazione del posto.

La libertà sindacale

Nell'articolo 14 lo Statuto dispone che il diritto di costituire associazioni sindacali, di aderirvi e di svolgervi attività sindacale, è garantito a tutti i lavoratori all'interno dei luoghi di lavoro.

Qualsiasi patto che subordini l'occupazione di un lavoratore alla condizione che aderisca a un'associazione sindacale o che cessi di aderirvi è illegittimo.

È altrettanto illegittimo licenziare un lavoratore, discriminarlo nell'assegnazione di qualifiche o mansioni, nei trasferimenti, nei provvedimenti disciplinari, nei trattamenti economici discriminatori o recargli alcun pregiudizio a causa della sua affiliazione a un'associazione sindacale o alla partecipazione a uno sciopero.

La stessa cosa vale anche nei casi di discriminazione politica, religiosa o razziale, di lingua, di sesso, di handicap, di età o basati sull'orientamento sessuale o sulle convinzioni personali.

I datori di lavoro non possono costituire o sostenere, con mezzi finanziari, associazioni sindacali dei lavoratori.

L'attività sindacale

Le attività sindacali sono regolate dallo Statuto, modificato dal referendum abrogativo dell'11 giugno 1995, che sancisce che le Rappresentanze Sindacali Aziendali (RSA) possano essere costituite a iniziativa dei lavoratori in ogni unità produttiva, nell'ambito delle associazioni sindacali che siano firmatarie di contratti collettivi di lavoro applicati nell'unità produttiva.

Il diritto di assemblea

I lavoratori hanno il diritto di riunirsi, nell'unità produttiva in cui prestano la loro opera, fuori dell'orario di lavoro, o nell'orario di lavoro nel limite di 10 ore annue, per le quali sarà corrisposta la normale retribuzione.

Il datore di lavoro deve consentire nell'ambito aziendale lo svolgimento, fuori dell'orario di lavoro, di referendum, sia generali sia di categoria, su materie inerenti l'attività sindacale, indetti da tutte le rappresentanze sindacali aziendali tra i lavoratori, con diritto di partecipazione di tutti i lavoratori dell'unità produttiva o appartenenti alla categoria interessata.

Le tutele sindacali

Un datore di lavoro non può, se non con il consenso delle rappresentanze sindacali, trasferire uno o più dirigenti sindacali delle rappresentanze aziendali. Questa tutela opera fino all'anno successivo a quello in cui cessa l'incarico.

I dirigenti sindacali hanno diritto a permessi retribuiti (almeno 8 ore al mese nelle grandi aziende) per l'espletamento del loro mandato e a permessi non retribuiti (al massimo per 8 giorni all'anno) per la partecipazione a trattative sindacali o a congressi o a convegni di natura sindacale.

Le rappresentanze sindacali aziendali hanno diritto ad affiggere in appositi spazi, predisposti dal datore di lavoro in luoghi accessibili a tutti i lavoratori all'interno dell'unità produttiva, pubblicazioni, testi e comunicati inerenti a materie di interesse sindacale e del lavoro.

Il datore di lavoro che abbia almeno 200 dipendenti deve predisporre, permanentemente a disposizione delle rappresentanze sindacali, un locale idoneo per l'esercizio delle loro funzioni. Nelle piccole aziende le RSA hanno diritto, a richiesta, di usufruire di un locale per le loro riunioni.

In presenza di impedimenti o limitazioni della libertà e dell'attività sindacale o del diritto di sciopero da parte del datore di lavoro, il magistrato può intervenire d'urgenza in via cautelativa, anche su ricorso dei sindacati in rappresentanza dei lavoratori, con un decreto motivato e immediatamente esecutivo che ordina la cessazione del comportamento illegittimo e la rimozione degli effetti che ostacolano l'attività. Tale provvedimento resta in vigore fino alla pronuncia successiva con sentenza del giudice.

I lavoratori eletti al Parlamento nazionale o europeo, nelle assemblee regionali o in altre funzioni pubbliche elettive possono, a richiesta, essere collocati in aspettativa non retribuita, per tutta la durata del mandato, terminato il quale potranno tornare al lavoro. La stessa facoltà è concessa ai lavoratori chiamati a ricoprire cariche sindacali provinciali e nazionali.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Quali libertà tutela lo Statuto dei lavoratori?
2. Il datore di lavoro, ai fini dell'assunzione, non può effettuare indagini che riguardano alcuni aspetti della personalità di un candidato. Quali?
3. Il datore di lavoro può controllare gli accessi alla rete Internet di un dipendente?
4. Con quali sanzioni e con quali modalità è possibile sanzionare il comportamento di un dipendente?
5. Quali sono i diritti di uno studente lavoratore?
6. Come viene regolata l'attività sindacale?
7. Sono previste tutele sindacali per i rappresentanti dei lavoratori? Quali?
8. I lavoratori eletti in assemblee elettive conservano il diritto allo stipendio e al posto di lavoro?

CAP 24

IL DIRITTO DI SCIOPERO

Concetti chiave

- Sciopero
- Sciopero bianco
- Servizi pubblici essenziali
- Commissione di garanzia
- Precettazione

Lo sciopero è una **forma di protesta** che si esercita con l'astensione dalla prestazione lavorativa da parte del personale dipendente, ed è previsto dall'art. 40 della Costituzione che recita: *"Il diritto di sciopero si esercita nell'ambito delle leggi che lo regolano"*.

Lo sciopero è quindi un diritto individuale che si esercita in forma collettiva. Durante il periodo di sciopero il lavoratore perde la retribuzione per le ore che non ha lavorato.

Le motivazioni dello sciopero possono essere molteplici: contro il datore di lavoro (per contestare un licenziamento ecc.), contro le associazioni imprenditoriali (per il rinnovo del contratto di categoria ecc.), contro il governo (per la riforma delle pensioni), per motivi generali (contro la guerra), per solidarietà (verso un'altra categoria di lavoratori).

Lo sciopero può essere generale (partecipano tutti i lavoratori), di categoria (tessili, meccanici, trasporti ecc.), nazionale o territoriale (regione, provincia, città).

Riguardo alla durata può essere di una giornata, di più giorni, a oltranza, parziale (per alcune ore, la prima ora, delle prestazioni straordinarie ecc.), a singhiozzo (si lavora per alcune ore, per altre si sciopera), a scacchiera (alcuni reparti scioperano, altri lavorano alternandosi).

Un metodo di sciopero è il cosiddetto "sciopero bianco" in cui si lavora ma si applica con meticolosità i regolamenti in modo da rallentare la produzione o i servizi.

Non è previsto il diritto di sciopero per Polizia di Stato e i militari.

Il diritto di sciopero può essere esercitato nel modo più ampio possibile, però non deve ledere la vita o l'incolumità delle persone e non deve pregiudicare il diritto di impresa salvaguardando l'integrità degli impianti produttivi, cioè, per esempio, un altoforno di un impianto siderurgico non può essere spento senza comprometterlo, pertanto anche in caso di sciopero bisogna garantire il funzionamento al minimo dell'impianto stesso.

I lavoratori in sciopero non possono essere sostituiti da altri dipendenti, né da lavoratori con contratti a termine o part-time.

Il datore di lavoro può utilizzare i lavoratori che non scioperano per continuare la produzione. Se i lavoratori non in sciopero non consentono la prosecuzione dell'attività, il datore può decidere di non impiegarli e di metterli in libertà così da non dover corrispondere loro la retribuzione. Il datore di lavoro non può retribuire con paga superiore i lavoratori non in sciopero o mettere in atto comportamenti che potrebbero essere interpretati come condotta antisindacale.

Nel comparto pubblico la proclamazione dello sciopero richiede un periodo di preavviso, nel comparto privato può anche essere immediato.

Nel pubblico impiego la Legge n. 146/1990 e la Legge n. 83/2000 disciplinano il diritto di sciopero nei servizi pubblici essenziali: trasporti pubblici urbani ed extraurbani; marittimi da e verso le isole; sanità; igiene pubblica; protezione civile; raccolta e smaltimento dei rifiuti solidi urbani, speciali, tossici e nocivi; approvvigionamento di energie e prodotti energetici; manutenzione degli impianti, limitatamente ai problemi inerenti alla sicurezza; pagamento delle pensioni; scrutini finali ed esami conclusivi dei cicli di studio nelle scuole e all'università; poste; telecomunicazioni e informazione.

I lavoratori di questi settori per poter scioperare hanno l'obbligo di dare un preavviso scritto di almeno dieci giorni e di comunicare, sempre per iscritto, la durata, le modalità e le motivazioni dell'astensione dal lavoro.

I lavoratori devono comunque garantire un livello minimo del servizio, per esempio, una fascia oraria in cui il servizio viene erogato, i servizi di pronto soccorso, la non astensione in periodi di grande mobilità (Natale, Ferragosto, Pasqua) ecc.

Le intese fra aziende e sindacati vengono valutate da una Commissione di garanzia sugli scioperi nei servizi pubblici essenziali.

La Commissione, in presenza di violazioni degli accordi, ha il potere di comminare sanzioni pecuniarie alle organizzazioni sindacali e sanzioni disciplinari ai dipendenti che hanno aderito a uno sciopero indetto in violazione della legge 146/1990. La Commissione può anche sollecitare la Presidenza del Consiglio dei Ministri (per gli scioperi nazionali) o le prefetture a emettere un decreto di precettazione, cioè l'ordine ai lavoratori di prestare servizio nonostante sia stato dichiarato lo sciopero. La precettazione può essere richiesta soltanto quando sussista un fondato pericolo di un pregiudizio grave e imminente ai diritti della persona costituzionalmente tutelati.

Se il lavoratore non osserva l'ordinanza di precettazione è passibile di sanzione pecuniaria. L'azienda viene a sua volta sanzionata se non provvede, nei cinque giorni che precedono lo sciopero, a informare la cittadinanza quali, in che modi e tempi siano i servizi garantiti. Se la programmazione degli scioperi avviene in giorni ravvicinati la Commissione può differire i giorni di sciopero in modo da ridurre al minimo i disagi per la popolazione.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Che cos'è lo sciopero?
2. Quali motivazioni possono provocare uno sciopero?
3. Chi non può scioperare?
4. Gli insegnanti possono scioperare e non partecipare alle operazioni di scrutinio di fine anno?
5. Lo sciopero nel settore pubblico è soggetto a limitazioni. Quali?
6. Si possono sostituire i lavoratori in sciopero?
7. L'impresa durante uno sciopero può operare per salvaguardare gli impianti?
8. 8. Che cos'è un decreto di precettazione? Chi lo può emanare?

CAP 25 LA TUTELA PREVIDENZIALE DEI LAVORATORI

1 Le prestazioni dell'Inps
2 Le prestazioni dell'Inail
3 Gli aspetti fiscali della retribuzione
4 La cessazione del rapporto di lavoro
5 Trattamento di fine rapporto lavoro

Concetti chiave

- Contribuzione previdenziale
- Indennità di malattia e di maternità
- Cassa integrazione guadagni
- TFR

1 LE PRESTAZIONI DELL'INPS

Ogni impresa con lavoratori subordinati deve iscriversi all'Inps (Istituto Nazionale della Previdenza Sociale) mediante un apposito modulo (DM68).

All'atto dell'iscrizione viene assegnato all'impresa: un numero di matricola che la identificherà in tutti i rapporti successivi con l'ente; il Codice Statistico Contributivo (formato da cinque cifre) che serve per qualificare l'inquadramento dell'azienda in uno dei seguenti settori, industria, artigianato, agricoltura, terziario, credito e assicurazione, attività varie; e altri codici particolari atti a individuare situazioni di natura agevolativa o autorizzativa.

L'impresa deve versare all'Inps i contributi obbligatori e di solidarietà a carico sia dell'azienda sia dei lavoratori con il fine di finanziare alcune gestioni come: il fondo pensioni dei lavoratori dipendenti; le prestazioni economiche assistenziali (malattia, disoccupazione maternità, mobilità, ecc.); il fondo di garanzia TFR (Trattamento di fine rapporto) e altre.

L'azienda provvede al versamento dei contributi entro il 16 di ogni mese utilizzando un apposito modello (F24) corredato dalla liquidazione dell'entità contributiva utilizzando il modello (DM10).

Il contributo viene calcolato sulla base della retribuzione costituita da tutte le somme e i valori percepiti nel periodo a qualsiasi titolo (salario, gratifiche, erogazioni liberali ecc.). Sono esclusi: le somme corrisposte a titolo di trattamento di fine rapporto; le somme corrisposte alla cessazione del rapporto di lavoro per agevolare l'esodo dei lavoratori; i proventi a titolo di risarcimento danni.

La base di calcolo per i contributi di previdenza e di assistenza sociale non può essere inferiore all'importo delle retribuzioni stabilito dalle leggi, dai regolamenti e dai Contratti collettivi stipulati dalle organizzazioni sindacali più rappresentative a livello nazionale.

L'assegno per il nucleo familiare

L'assegno per il nucleo familiare spetta ai lavoratori dipendenti, ai lavoratori a domicilio, ai lavoratori a tempo parziale e agli apprendisti. Viene calcolato tenendo conto del numero dei componenti il nucleo familiare e del relativo reddito complessivo e coincide con quello assoggettabile all'Irpef (Imposta sul reddito delle persone fisiche). Sono esclusi dalla percezione, il coniuge e i parenti e affini del datore di lavoro.

Il lavoratore dipendente per percepire l'assegno deve presentare il modello (ANF/DIP) e lo stato di famiglia. Non può essere concesso più di un assegno per lo stesso nucleo familiare.

L'indennità di malattia

L'indennità di malattia è corrisposta in sostituzione della retribuzione. Essa è pagata dal datore di lavoro.

Durante il periodo di malattia i primi tre giorni, detti di "carenza", sono a carico del datore di lavoro, dal quarto giorno viene anticipata dal datore di lavoro, per conto dell'Inps, un'indennità che ha una durata massima di 180 giorni. L'indennità a carico dell'Inps è pari al 50% della retribuzione giornaliera percepita nel mese precedente al periodo di malattia, dal 4° giorno fino al 20°; per i giorni successivi e fino al 180° il contributo sale al 66%.

Il lavoratore per poter usufruire dell'indennità di malattia deve giustificare l'assenza dal lavoro presentando il certificato di malattia (dal 2011 è il medico che lo invia telematicamente al momento del rilascio); successivamente il lavoratore dovrà presentare il certificato originale.

Al fine di permettere all'ente di verificare l'effettivo stato di salute del lavoratore, viene indicato sul certificato di malattia il domicilio dello stesso nel periodo di malattia. Se il medico, incaricato dall'Asl locale di eseguire tale controllo, non riesce a effettuarlo a causa dell'inesattezza dell'indirizzo indicato, il lavoratore sarà sottoposto a una sanzione economica. Il lavoratore al fine di permettere il controllo deve essere reperibile all'indirizzo indicato dalle ore 10.00 alle ore 12.00 e dalle ore 17.00 alle ore 19.00, comprese le domeniche e i giorni festivi. Gli orari per i dipendenti pubblici sono stati recentemente allungati.

Le assenze alla visita di controllo durante le fasce orarie indicate possono essere giustificate dal lavoratore per causa di forza maggiore e adeguatamente documentate, in caso contrario viene applicata una sanzione.

La maternità

Il congedo di maternità è un'astensione obbligatoria che vieta al datore di lavoro di adibire al lavoro le madri lavoratrici nei due mesi antecedenti la data presunta del parto, nel periodo intercorrente fra la data presunta e quella effettiva e 3 mesi dopo il parto.

Se le attività lavorative cui la lavoratrice è adibita è gravosa e può essere di pregiudizio, il periodo *ante partum* può essere elevato di ulteriori 3 mesi. Se durante la gestazione si manifestano complicanze o la gestante è adibita a lavorazioni in condizioni ambientali che possono essere di pregiudizio a se stessa e/o al bambino il Servizio Ispettivo della Direzione provinciale del Lavoro competente può, su richiesta della lavoratrice, disporre l'interdizione anticipata dal lavoro.

L'art. 32 del D.Lgs n. 151/2001 prevede che si possa estendere, trascorsi i 3 mesi dopo la nascita del bambino, la possibilità di chiedere il congedo parentale (astensione facoltativa) per altri 6 mesi, anche frazionati, entro il terzo e ottavo anno del bambino. Tale periodo può essere richiesto sia dal padre sia dalla madre.

Cassa integrazione guadagni

La cassa integrazione guadagni è un ammortizzatore sociale che integra o sostituisce la retribuzione dei lavoratori sospesi o che lavorano a orario

ridotto a causa della riduzione dell'attività dell'impresa derivante da reali difficoltà produttive.

Può assumere due forme: ordinaria e straordinaria.

La cassa integrazione guadagni **ordinaria** è prevista in presenza di sospensioni o contrazione dell'attività produttiva per situazioni temporanee di mercato o per eventi non imputabili all'imprenditore o alle maestranze. Dura fino a un massimo di 13 settimane consecutive prorogabili eccezionalmente fino a un massimo di 52 settimane e possono usufruirne gli operai, gli impiegati e i quadri delle imprese industriali. Durante il periodo di cassa integrazione si matura il diritto alla pensione, ma i lavoratori non devono svolgere alcuna attività lavorativa pena la decadenza del beneficio.

La cassa integrazione guadagni **straordinaria** è prevista nei casi di ristrutturazione, riorganizzazione, conversione, crisi aziendale, fallimento, liquidazione coatta amministrativa. Spetta a operai, impiegati e quadri che lavorano in imprese industriali, artigiane, di vigilanza, appaltatrici di servizi di pulizia, cooperative che, nel semestre precedente la domanda, abbiano occupato più di 15 dipendenti. Spetta inoltre ai dipendenti di imprese commerciali, di viaggi e turismo, di spedizioni e trasporto con oltre 50 dipendenti. Ha una durata di 12 mesi in caso di crisi aziendale, di 18 mesi in caso di procedure esecutive concorsuali e di 24 mesi in caso di riorganizzazione, ristrutturazione e riconversione aziendale.

2 LE PRESTAZIONI DELL'INAIL

L'Inail (Istituto Nazionale Assicurazione Infortuni Lavoratori) ha il compito di fornire un'adeguata assistenza economica e sanitaria ai lavoratori che subiscono un infortunio, che sono colpiti da malattie professionali o da danno biologico.

I lavoratori sono assicurati anche nel percorso *in itinere* casa-luogo di lavoro o, se è assente la mensa sul luogo di lavoro, anche nel percorso luogo di lavoro-punto di ristoro.

Devono essere assicurate tutte le persone dipendenti da privati o da enti pubblici che esercitano attività soggette a rischio. Fra queste vi sono gli insegnanti e gli studenti che eseguono esperienze o esercitazioni pratiche.

I datori di lavoro si iscrivono presso l'istituto assicurativo all'inizio dell'attività soggetta a rischio.

Il lavoratore ha l'obbligo di avvisare tempestivamente il datore di lavoro dell'avvenuto infortunio, pena la decadenza dell'indennizzo per il periodo che precede la presentazione della denuncia. A sua volta, il datore di lavoro ha l'obbligo di presentare, con apposita modulistica, le denunce all'Inail e all'autorità di Pubblica sicurezza entro 2 giorni dal ricevimento del primo certificato medico di infortunio per gli infortuni superiori 3 giorni. Se l'inabilità per un infortunio con prognosi guaribile in 3 giorni si prolunga al quarto giorno o oltre, l'obbligo di denuncia deve essere fatta entro 2 giorni a partire dal quarto giorno.

Se l'infortunio provoca la morte o il pericolo di vita, il datore di lavoro deve anticipare la denuncia all'Inail con telegramma o fax entro 24 ore dal momento dell'infortunio.

Le aziende, entro il 16 febbraio di ogni anno, devono versare un pre-

mio assicurativo all'Inail calcolato prendendo come riferimento il reddito imponibile al lordo delle trattenute di legge.

Per determinare il premio assicurativo, la tariffa dei premi Inail per ciascuna voce di rischio può essere aumentata o diminuita in relazione all'andamento degli infortuni aziendali e delle protezioni antinfortunistiche adottate.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Quale procedura deve seguire un'impresa per iscriversi all'Inps?
2. Come viene calcolato il contributo che il lavoratore e l'impresa devono versare all'Inps?
3. Che cos'è l'assegno per il nucleo familiare? A chi spetta?
4. Chi paga l'indennità di malattia di un lavoratore?
5. Quali sono i periodi spettanti per il congedo di maternità?
6. Quali sono le prestazioni erogate dall'Inail?

3 GLI ASPETTI FISCALI DELLA RETRIBUZIONE

L'art. 23 del DPR n. 600/73 ha delegato il datore di lavoro come sostituto d'imposta. È il datore di lavoro che all'atto del pagamento della retribuzione al lavoratore calcola e trattiene a titolo di acconto sul reddito delle persone fisiche la somma dovuta e la versa all'erario entro il giorno 16 del mese successivo.

Ai fini Irpef, il reddito imponibile è formato da tutti i valori a qualsiasi titolo effettivamente percepiti nel periodo d'imposta in relazione al rapporto di lavoro. Sono esclusi i rimborsi spese sostenute dal lavoratore fuori del territorio comunale (trasferta o missione) e i rimborsi delle spese di viaggio.

Il rimborso può essere **forfettario** (il lavoratore sostiene tutte le spese e riceve per ogni giorno nel territorio nazionale o all'estero un contributo forfettario), **misto** (rimangono a carico del lavoratore o le spese di alloggio o quelle di vitto e riceve un contributo forfettario), **analitico** (vengono rimborsate a piè di lista le spese di vitto e di alloggio documentate da fatture e ricevute).

L'imposta netta viene calcolata togliendo dall'imponibile le detrazioni per carichi di famiglia e applicando poi le aliquote fiscali previste.

Le detrazioni per carico di famiglia vengono applicate dal datore di lavoro su richiesta del lavoratore che deve presentare un'apposita dichiarazione con cui si impegna a segnalare tempestivamente ogni modificazione della situazione familiare.

Entro il 28 febbraio dell'anno successivo o alla data di cessazione del rapporto di lavoro, se precedente, il datore di lavoro effettua il conguaglio annuale, calcolando l'imposta annuale effettivamente dovuta, la confronta con quella effettivamente versata e, in quanto sostituto d'imposta, procede a trattenere le cifre dovute e a rimborsare eventuali eccedenze.

Eventuali emolumenti arretrati che sono stati corrisposti nell'anno, ma che erano dovuti negli anni precedenti e che non sono stati erogati per cause non dipendenti dalla volontà delle parti (arretrati contrattuali

dovuti alla sottoscrizione di accordi sindacali), vengono sottoposti a tassazione separata e l'aliquota applicata è pari a quella generata dalla media di quella applicata nei due anni precedenti.

Oltre alla tassazione del reddito Irpef statale, si aggiungono anche due addizionali dovute alla Regione e al Comune. La base imponibile è la stessa che viene utilizzata per la tassazione statale, mentre non è dovuta per i redditi soggetti a tassazione separata.

L'aliquota dell'addizionale dovuta alla Regione dove il lavoratore ha il proprio domicilio è compresa fra lo 0,9% e l'1,4%.

L'aliquota dovuta al Comune dove il lavoratore ha il proprio domicilio fiscale si compone di una parte fissa, uguale per tutto il territorio nazionale, e una parte variabile che ciascun comune può deliberare autonomamente. È evidente che, a parità di retribuzione, un lavoratore paga maggiori o minori tasse Irpef in relazione al suo comune di domiciliazione fiscale.

Il datore di lavoro, in qualità di sostituto di imposta, ogni anno entro il 15 marzo rilascia al lavoratore una dichiarazione dei compensi corrisposti nell'anno precedente, denominata CUD, nella quale sono indicate le detrazioni d'imposta applicate, le ritenute operate, le aliquote fiscali applicate, le addizionali regionali e comunali applicate e, ai fini previdenziali, la retribuzione previdenziale, le settimane di lavoro accreditate ecc.

Il datore di lavoro presenta poi una dichiarazione unica riepilogativa, il Modello 770, che ha valenza sia per le imposte sia per le contribuzioni previdenziali.

4 LA CESSAZIONE DEL RAPPORTO DI LAVORO

La risoluzione del rapporto di lavoro può avvenire per dimissioni del lavoratore, per licenziamento, può essere consensuale fra le parti o può verificarsi per altre cause indipendenti dalla volontà delle parti.

Il lavoratore può cessare in qualsiasi momento il rapporto di lavoro, rassegnando le sue dimissioni. Il suo unico obbligo è di dare un certo preavviso, la cui durata è stabilita dagli accordi contrattuali. La comunicazione delle dimissioni può essere anche orale, ma è preferibile la forma scritta.

Se le dimissioni sono dovute a un comportamento vessatorio assunto dal datore di lavoro, il dipendente, per giusta causa, può abbandonare immediatamente il lavoro e ha diritto a un'indennità di preavviso.

Un altro caso di dimissioni è quello per il raggiungimento della pensione per anzianità. Il lavoratore può recedere dal rapporto o lo può proseguire fino al raggiungimento dei limiti d'età (66 anni) dandone comunicazione al datore di lavoro entro 6 mesi prima della data in cui matura il diritto alla pensione di vecchiaia.

Le cause che portano alla cessazione del rapporto di lavoro senza accordo delle parti sono: la morte del lavoratore e l'arresto del dipendente.

Il licenziamento è l'atto con cui il datore di lavoro recede dal contratto in termini unilaterali; il licenziamento può essere individuale o di più lavoratori (collettivo o plurimo).

Il licenziamento individuale può avvenire:

— per giusta causa, detto anche in tronco (generato da una causa che non consente la prosecuzione, anche provvisoria, del rapporto di lavoro);

— per giustificato motivo soggettivo o oggettivo (a carattere disciplinare per colpa del lavoratore, dopo una particolare procedura imposta dall'art. 7 dello Statuto dei Lavoratori);
— senza obbligo di motivazione o *ad nutum* (avviene solo per i lavoratori domestici, per i lavoratori in prova, per i dirigenti, lavoratori che hanno raggiunto l'età pensionabile; il datore di lavoro ha solo l'obbligo del preavviso).

Se viene accertato che il datore di lavoro di un'impresa con **meno di 15 dipendenti** (tutela obbligatoria) ha proceduto a un licenziamento senza che sussista la giusta causa, egli è tenuto a riassumere, entro 3 giorni, il dipendente o a corrispondergli un'indennità che va da 2,5 a 6 mensilità dell'ultima retribuzione globale di fatto.

Per un'impresa con **più di 15 dipendenti**, soggetta alla cosiddetta tutela reale, l'illiceità del licenziamento comporta il reintegro del dipendente, il pagamento di un'indennità di risarcimento pari a 5 mensilità, il pagamento dei contributi previdenziali e assistenziali per il periodo compreso fra il licenziamento e il reintegro. Il lavoratore può rinunciare al reintegro, in questo caso però, percepirà un'indennità pari a 15 mensilità.

Con la cessazione del rapporto di lavoro, il datore di lavoro deve effettuare alcuni adempimenti:
— darne comunicazione all'Inail nello stesso giorno;
— annotare la data di cessazione sul libro matricola e sul libretto di lavoro, quest'ultimo va poi consegnato al dipendente;
— darne comunicazione al Centro per l'impiego (entro 5 giorni).

5 TRATTAMENTO DI FINE RAPPORTO LAVORO

Il lavoratore subordinato ha diritto alla corresponsione del Trattamento di fine rapporto (TFR).

Questo trattamento economico si calcola sommando, per ogni anno di servizio, una quota pari e non superiore all'ammontare della retribuzione dovuta per l'anno divisa per 13,5 e ridotta per le frazioni d'anno non computabili in forma intera (inferiore ai 15 giorni).

La quota accantonata ogni anno, tranne quella dell'ultimo anno, viene rivalutata, alla fine di ogni anno, di un tasso pari all'1,5 % in misura fissa, aumentato del 75% del tasso di inflazione annuale accertato dall'Istat.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Quali sono le cause che determinano la cessazione di un rapporto di lavoro?
2. Il lavoratore può recedere dal rapporto di lavoro quando lo desidera? È sempre tenuto a dare un preavviso?
3. In quali condizioni il datore di lavoro può procedere a un licenziamento individuale?
4. Che cos'è Il trattamento di fine rapporto (TFR)?
5. Come si calcola il TFR?

CAP 26 LA SICUREZZA SUL LAVORO

1 Il servizio di prevenzione e protezione dai rischi
2 Piano di emergenza
3 Segnaletica di sicurezza
4 Pronto soccorso aziendale
5 Il mobbing
6 Il Codice della privacy e le misure minime di sicurezza

Concetti chiave

- Documento di valutazione dei rischi
- Rappresentante dei lavoratori per la sicurezza (RLS)
- Mobbing
- Dati sensibili
- Responsabile del trattamento dati
- Misure minime di sicurezza
- Documento programmatico della sicurezza (DPS)

1 IL SERVIZIO DI PREVENZIONE E PROTEZIONE DAI RISCHI

Dopo la tragedia del rogo che alla Thyssen Krupp di Torino, nella notte fra il 5 il 6 dicembre 2007, è costato la vita a sette operai, la legislazione in materia di sicurezza sul lavoro è stata rivista. Il Testo unico sulla salute e la sicurezza nei luoghi di lavoro è stato integrato dal Decreto legislativo n. 81/2008. Il decreto ha rafforzato la normativa previgente riguardo le norme di prevenzione, al fine di favorire una maggiore cooperazione fra lavoratori e aziende, puntando sull'aspetto regolatorio e repressivo.

Nella ***tabella 26.1*** sono elencate le principali norme che tutelano il diritto alla salute sul lavoro.

I lavoratori hanno diritto di operare in un ambiente rispettoso delle norme, ma hanno anche il dovere di partecipare alla formazione, di utilizzare i dispositivi di sicurezza previsti e di segnalare al datore di lavoro, attraverso il Rappresentante dei lavoratori per la sicurezza (RLS), le eventuali carenze del sistema di prevenzione e sicurezza o i possibili miglioramenti apportabili a esso.

Il datore di lavoro ha il dovere di valutare i rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori, di prevenirli con soggetti e strutture di supporto (medico competente, servizio di prevenzione e protezione) e di adottare tutte le misure necessarie senza ritardi.

Il Testo unico in materia di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro (TUSL) si compone di 13 titoli e 306 articoli; le sue disposizioni si applicano a tutti i lavoratori subordinati e autonomi, equiparabili a questi anche i titolari di contratti atipici (collaboratori a progetto, soci di cooperative, co.co.co, tirocinanti, lavoratori occasionali, associati in partecipazione ecc.). Per i lavoratori interinali (a somministrazione), il rispetto delle norme di prevenzione è a carico dell'azienda in cui lavorano, mentre la formazione è a carico dell'agenzia di somministrazione.

Nei settori a maggior rischio infortunistico (per esempio l'edilizia) sono stati introdotti sistemi a punti, per qualificare le imprese e i lavoratori autonomi, premiando i virtuosi e punendo gli altri. Ogni infortunio o violazione rilevata delle norme comporta una perdita di punti: questo

Tabella 26.1 Le principali norme che tutelano il diritto al lavoro

NORMA	DESCRIZIONE
Costituzione della Repubblica italiana	**Art. 32** *"La Repubblica tutela la salute come fondamentale diritto dell'individuo ed interesse della collettività* (omissis)". **Art. 41** *"L'iniziativa economica privata è libera. Non può svolgersi in contrasto con l'utilità sociale o in modo da recare danno alla sicurezza, alla libertà, alla dignità umana* (omissis)".
Codice civile	**Art. 2087** *"L'imprenditore è tenuto ad adottare nell'esercizio dell'impresa le misure che, secondo la particolarità del lavoro, le esperienze e la tecnica, sono necessarie a tutelare l'integrità fisica e la personalità morale dei prestatori di lavoro*".
Codice penale	Vengono considerati più gravi i reati di omicidio colposo (**art. 589**) e di lesioni personali colpose (**art. 590**), se commessi in violazione delle norme per la prevenzione degli infortuni sul lavoro.
DPR n. 547/55	**Norme generali per la prevenzione degli infortuni** Ampio e importante decreto che stabilisce i requisiti tecnici che debbono avere gli ambienti di lavoro, gli impianti, le macchine, le attrezzature, gli utensili ecc. Vieta, inoltre, i comportamenti che generano rischi.
DPR n. 303/56	**Norme generali per l'igiene del lavoro** Tutela l'igiene del lavoro dettando una serie di requisiti tecnici sulle caratteristiche strutturali dei luoghi di lavoro e dei servizi igienico-assistenziali. Tratta le misure che impediscono l'inquinamento da agenti chimici, fisici e biologici e i criteri di sorveglianza sanitaria dei lavoratori. Alcuni articoli hanno subito modifiche e aggiornamenti con decreti successivi (vedi, per esempio, i D.Lgs. nn. 626/94 e 242/96).
D.Lgs. n. 277/91	**Attuazione di cinque direttive CEE in materia di protezione dei lavoratori** Contiene prescrizioni precise riguardo alle misure di tutela della salute dei lavoratori esposti ad agenti nocivi in generale e in particolare piombo, amianto e rumore.
D.Lgs. n. 626/94	**Attuazione di otto direttive CEE in materia di protezione dei lavoratori** Contiene disposizioni generali in materia d'organizzazione della prevenzione, gestione delle emergenze, sorveglianza sanitaria dei lavoratori, consultazione e partecipazione, informazione e formazione dei lavoratori. Disciplina l'uso dei dispositivi di protezione individuale. Contiene, inoltre, prescrizioni precise per la prevenzione dei rischi da movimentazione manuale dei carichi, uso di attrezzature munite di videoterminali, esposizione ad agenti cancerogeni e agenti biologici.
D.Lgs. n. 758/94	Modifica la disciplina sanzionatoria in materia di lavoro.
D.Lgs. n. 242/96	Integra e modifica il D.Lgs. n. 626/94. Per l'applicazione della normativa nell'Università, viene prevista l'emissione di un apposito decreto ministeriale.
D.Lgs. n. 493/96	Contiene le prescrizioni minime per la segnaletica di sicurezza e/o salute sul luogo di lavoro.
D.Lgs. n. 645/96	Tratta il miglioramento della sicurezza e della salute sul lavoro delle lavoratrici gestanti, puerpere o in periodo d'allattamento.

metodo diventa così uno strumento per valutare l'idoneità tecnico-professionale dell'impresa e dei lavoratori autonomi. L'azzeramento dei punti comporta l'impossibilità per l'impresa e per il lavoratore autonomo di operare in quel settore.

Il datore di lavoro ha l'obbligo di individuare e valutare tutti i rischi, compresi quelli di stress legati all'attività svolta, e di elaborare uno speci-

fico documento (**Documento di valutazione dei rischi**) che li elenchi dettagliatamente accompagnato dalle misure di prevenzione e protezione intraprese. Oltre alle disposizioni per la riduzione dei rischi, il documento deve indicare i nomi del Responsabile del servizio di prevenzione e protezione (RSPP), del Rappresentante dei lavoratori per la sicurezza (RLS) e del medico competente che ha partecipato alla valutazione del rischio.

Il datore di lavoro deve attivare nell'azienda un Servizio di Prevenzione e Protezione dai rischi (SPP), composto dall'insieme di persone, sistemi, mezzi esterni o interni all'azienda, finalizzato all'attività di prevenzione e protezione dai rischi professionali per i lavoratori.

Responsabile della sicurezza prevenzione e protezione (RSPP)

Il Responsabile della sicurezza prevenzione e protezione è una **persona designata dal datore di lavoro, in possesso di attitudini e capacità adeguate**. È l'esperto aziendale in tema di sicurezza, di cui tutte le attività produttive hanno l'obbligo di dotarsi. I requisiti che il RSPP deve possedere sono **formazione** e **capacità professionali adeguati alla natura dei rischi presenti sul luogo di lavoro e alle attività lavorative**. È richiesto inoltre il **possesso di un diploma di istruzione secondaria superiore**, di un **attestato di frequenza**, con **verifica dell'apprendimento**, a **specifici corsi di formazione** in materia di prevenzione e protezione dei rischi di natura ergonomica e psico-sociale, di organizzazione e gestione delle attività tecnico-amministrative e di tecniche di comunicazione in azienda e di relazioni sindacali.

Anche per lo svolgimento della funzione di Addetto del servizio di prevenzione e protezione (ASPP), oltre al diploma di istruzione secondaria superiore, è richiesto un attestato di frequenza, con verifica dell'apprendimento, a specifici corsi di formazione relativi alla natura dei rischi presenti sul luogo di lavoro e alle attività lavorative.

I responsabili e gli addetti dei servizi di prevenzione e protezione sono tenuti a **frequentare corsi di aggiornamento con cadenza almeno quinquennale**.

Il datore di lavoro, come stabilito dall'art. 10 del D.Lgs. n. 626/94, può **svolgere direttamente i compiti propri del Servizio di prevenzione e protezione dai rischi**, nonché di prevenzione incendi e di evacuazione, nel caso di aziende artigiane e industriali fino a 30 addetti, **dandone preventiva informazione al Rappresentante dei lavoratori per la sicurezza** e a seguito di apposita frequenza di un corso di formazione in materia di sicurezza e salute sul luogo di lavoro.

Medico competente

Il medico competente deve essere, ove possibile, dipendente del Servizio sanitario nazionale e in possesso di titoli idonei (specializzazione in medicina del lavoro o in medicina preventiva dei lavoratori e psicotecnica, o in tossicologia industriale) a far ritenere sussistenti quell'insieme di conoscenze tecnico-scientifiche ed esperienze tali da poter svolgere adeguatamente il ruolo normativamente codificato. Il medico competente svolge compiti di integrazione del sistema organizzativo complessivo della "sicurezza" dei luoghi di lavoro, essendo titolare di obblighi anche "operativi" e fondamentali nella gestione integrata del "sistema sicurezza". La legge gli

affida delicatissime funzioni di valutazione preventiva sull'idoneità dei lavoratori a specifiche mansioni; ciò implica, pertanto, conoscenze dell'organizzazione, delle mansioni stesse, dell'intero assetto della struttura dell'impresa e delle sue molteplici implicazioni produttive, organizzative, ambientali.

La sorveglianza sanitaria effettuata dal medico competente comprende **accertamenti preventivi**, intesi a constatare l'assenza di controindicazioni al lavoro cui i lavoratori sono destinati ai fini della valutazione della loro idoneità alla mansione specifica, e **accertamenti periodici** per controllare lo stato di salute dei lavoratori ed esprimere il giudizio di idoneità alla mansione specifica.

Rappresentante dei lavoratori per la sicurezza (RLS)

Al fine di rendere effettiva la partecipazione dei lavoratori al sistema di prevenzione e sicurezza, è stata istituita la figura del Rappresentante dei lavoratori per la sicurezza con il compito di rappresentarli in merito ai problemi di salute e sicurezza.

Nelle aziende che occupano fino a 15 dipendenti il RSL è eletto direttamente dai lavoratori al loro interno, mentre nelle aziende con più di 15 dipendenti viene eletto o designato dai lavoratori nell'ambito della Rappresentanza sindacale unitaria (RSU).

La normativa individua tre classi di aziende che necessitano di un numero minimo di RSL:

— 1 rappresentante in aziende fino a 200 dipendenti;
— 3 rappresentanti in aziende da 201 a 1000 dipendenti;
— 6 rappresentanti in aziende con più di 1000 dipendenti.

Gli RLS hanno diritto di partecipare alla procedura di valutazione e prevenzione dei rischi per la preparazione del relativo documento. Devono essere informati dall'azienda di tutte le situazioni di potenziale pericolo e hanno il diritto di consultazione e di proposta. Hanno le stesse tutele garantite ai rappresentanti sindacali.

Il RLS deve sviluppare il proprio operato in modo da essere parte attiva del sistema aziendale, entrando in modo propositivo nell'organizzazione e nella gestione delle attività lavorative e diventando il "filo d'unione" tra gli Enti preposti (nella loro doppia attività di controllo-verifica e informativo-assistenziale), l'Organismo paritetico provinciale (OPP), il datore di lavoro, il medico competente, il RSPP/SPP, i lavoratori e, quando necessario, la magistratura.

Il RLS può avere a sua disposizione, se tutto funziona come previsto, un'enorme quantità d'informazioni su ambiente e sicurezza e diventare un preciso riferimento per l'azienda, la quale dovrà assumersi il compito di farlo diventare una figura preparata e competente per poter così sviluppare un sistema partecipativo, efficace e produttivo.

Il Rappresentante deve acquisire capacità tali da essere in grado di:

— individuare, trovare, catalogare, analizzare, smistare, indirizzare tutte le informazioni ricevute;
— sensibilizzare i lavoratori affinché destinino parte delle loro capacità professionali all'individuazione del rischio e alla concreta collaborazione per la definizione delle misure migliorative, alla loro realizzazione, al loro mantenimento nel tempo;

— coinvolgere tutti i soggetti operanti nell'impresa affinché l'attenzione sulle tematiche di ambiente e sicurezza, diventi parte integrante del lavoro;
— stimolare il datore di lavoro e le varie funzioni deputate alla sicurezza affinché, a seguito della valutazione dei rischi (presenti e potenziali), siano approntati i percorsi migliorativi previsti e necessari;
— valutare l'idoneità delle misure di protezione e prevenzione, formazione e informazione adottate, per poter essere in grado di verificarne l'efficacia e la corrispondenza alla "miglior conoscenza", e richiedere l'intervento di autorità e organi competenti, se necessario.

Pertanto il RLS deve:
— promuovere iniziative per l'attuazione delle misure di prevenzione;
— formulare osservazioni in occasione delle visite e verifiche effettuate dalle autorità competenti;
— partecipare alla riunione periodica indetta almeno una volta l'anno.
— avvertire il datore di lavoro dei rischi individuati, e ricorrere agli organi competenti qualora ritenga che le misure adottate non siano idonee a garantire la sicurezza;
— accedere liberamente a tutta la documentazione aziendale, alle informazioni sui flussi d'attraversamento (materia prima, energia e risorse trasformate in prodotto dall'entrata all'uscita della fabbrica e rifiuti), al registro infortuni e a tutti i luoghi di lavoro;
— disporre del tempo necessario allo svolgimento dell'incarico.

Poiché gli RLS nell'esercizio della loro funzione vengono a conoscenza di particolari riservati e coperti da tutela, sono tenuti al segreto in ordine ai processi produttivi.

Doveri dei lavoratori

Ogni lavoratore deve prendersi cura, conformemente alla sua formazione, alle istruzioni e ai mezzi forniti dal datore di lavoro, della propria sicurezza e della propria salute e di quella delle persone che sono presenti sul luogo di lavoro su cui possono ricadere gli effetti dei suoi errori od omissioni. Essi devono quindi:
- osservare le disposizioni e le istruzioni del datore di lavoro, dei dirigenti e dei preposti, ai fini della protezione individuale e collettiva;
- utilizzare nel modo corretto le apparecchiature, i macchinare, gli utensili, le sostanze e i preparati pericolosi, i mezzi di trasporto, le attrezzature e i dispositivi di sicurezza;
- utilizzare i dispositivi individuali di protezione;
- non rimuovere o modificare i dispositivi di sicurezza o di segnalazione o di controllo;
- sottoporsi ai controlli sanitari previsti dal medico competente;
- mantenere il pavimento dei luoghi di lavoro e di passaggio in ordine e segnalare la presenza di sostanze che lo rendano scivoloso;
- non occupare i percorsi di emergenza con oggetti;
- lasciare sempre il posto di lavoro in ordine e pulito, per evitare che si possano verificare incidenti o siano di ostacolo al movimento;
- non rimuovere, non imbrattare o rendere poco visibili i cartelli di segnalazione delle vie di fuga, dei pericoli o degli obblighi;

- non impedire la libera apertura delle porte di emergenza;
- rispettare i divieti e gli obblighi indicati dall'apposita segnaletica;
- segnalare immediatamente al datore di lavoro, ai dirigenti o ai preposti le deficienze di apparecchiature, mezzi e dispositivi, nonché le altre eventuali condizioni di pericolo di cui vengono a conoscenza, dandone notizia al RLS;
- dare sempre immediata comunicazione, ai diretti superiori, dell'infortunio eventualmente verificatosi, anche se non richiede particolari cure;
- effettuare le pause prescritte, se si lavora a un videoterminale (circa 15 minuti ogni 2 ore).

Le sanzioni

La legge prevede delle ammende per il datore di lavoro che non ottempera alle disposizioni, che sono inderogabili. Il datore di lavoro e i dirigenti devono vigilare sugli obblighi che fanno capo agli altri soggetti del sistema.

In caso di inadempienze, come la mancata valutazione del rischio, la non adozione delle opportune contromisure, la mancata o insufficiente informazione e formazione dei lavoratori, il datore di lavoro e i dirigenti sono responsabili per qualsiasi infortunio anche se addebitabile al comportamento del dipendente.

Le sanzioni penali scattano solo nel caso di violazioni sostanziali delle norme non per quelle formali.

Il reato sanzionato con ammenda può essere estinto adempiendo alle misure riparatrici delle violazioni riscontrate insieme con il pagamento della sanzione pecuniaria.

Nel caso di situazioni di particolare gravità, gli organi di vigilanza del ministero del Lavoro e delle USL possono deliberare la sospensione delle delle attività (o di parte di esse) oggetto delle violazioni; in ugual modo il blocco delle attività può essere deciso dopo ripetute violazioni nel tempo o per contrastare il lavoro nero.

In aziende ove il rischio di incidenti è elevato e nei cantieri edili è previsto anche l'arresto del datore di lavoro qualora non si fosse proceduto alla valutazione dei rischi.

Come già scritto, il TUSL assegna al lavoratore una parte attiva, egli deve contribuire, insieme al datore di lavoro, ai dirigenti e ai preposti, all'adempimento degli obblighi previsti a tutela della salute e sicurezza sui luoghi di lavoro, deve applicare le disposizioni impartite, deve utilizzare correttamente le attrezzature di lavoro, le sostanze e i preparati pericolosi, i mezzi di trasporto e i dispositivi di protezione che ha a disposizione. È anche tenuto a segnalare tempestivamente le deficienze riscontrate, e qualsiasi situazione di pericolo. Inoltre ha l'obbligo di partecipare ai corsi di informazione, formazione e addestramento organizzati dal datore di lavoro e di sottoporsi ai controlli sanitari previsti.

Dispositivi di protezione individuale

Il datore di lavoro deve rendere disponibili, in quantità e qualità sufficienti, tutti i dispositivi di protezione individuali (DPI) necessari per prevenire gli infortuni sul lavoro. I principali DPI sono:

— abbigliamento ad alta visibilità e antifreddo;
— protezione del capo e del viso: mascherine, visiere, caschi ed elmetti;
— calzature antinfortunistiche e da lavoro, stivali da laboratorio;

— protezione delle vie respiratorie: maschere per polveri tossiche e per vapori organici;
— dispositivi anticaduta: moschettoni, punti di ancoraggio, imbracature e cordini;
— protezione per le mani: guanti in poliuretano, in neoprene, in nitrile, in PVC; in maglia metallica, di protezione termica;
— protezione dell'udito: inserti auricolari ad archetto o a espansione, cuffie;
— protezione degli occhi da spruzzi, da particelle in movimento o da sostanze chimiche, mediante occhiali con aste o elastici;
— indumenti di protezione: tute e camici.

ESERCIZIO 1

SERVIZIO DI PREVENZIONE E PROTEZIONE DAI RISCHI IN UN ISTITUTO SCOLASTICO

L'Istituto in cui studiate è soggetto, come qualsiasi attività, alle norme di prevenzione e sicurezza.
Le scuole sono dotate di attrezzature, macchinari (motori elettrici, torni, frese, attrezzature di laboratorio ecc.) e utilizzano sostanze potenzialmente pericolose (sostanze chimiche nei laboratori, detersivi, gas ecc.) per cui è stato sicuramente realizzato il Documento di valutazione dei rischi e, essendo pubblico, può essere consultato. Si invitano gli allievi a consultarlo in modo critico e di discutere le scelte operate con i Responsabili della sicurezza dell'Istituto.
Questo esercizio basato su un documento vero, che si occupa della realtà ben conosciuta dell'Istituto in cui si opera ogni giorno aiuterà gli stessi studenti a rendersi conto di come un ambiente familiare nasconda situazioni di pericolo talvolta generati da comportamenti non consoni all'ambiente in cui si vive. Questa analisi, inoltre, renderà ciascuno consapevole che un problema di sicurezza rilevato non è un concetto astratto ma è una situazione reale che coinvolge tutti e che deve quindi essere prontamente segnalato.
Si scoprirà, per esempio, che l'accesso a certi laboratori e officine deve avvenire mediante dispositivi di protezione individuale e attrezzature di lavoro adatte (tute, camici, occhiali di protezione ecc.). Si potrà verificare se l'Istituto fa un'attività di informazione e di formazione sufficiente, se tutte le aule e i corridoi sono provvisti delle cartine e delle segnalazioni per le vie di fuga, se vengono effettuate le periodiche esercitazioni di simulazione per controllare se il dispositivo di sicurezza funziona nel modo adeguato, se le aree di raccolta sono idonee, se la procedura di raccolta delle informazioni è funzionale e permette di individuare prontamente le persone assenti e quindi di poter attivare tempestivamente le procedure di ricerca e recupero.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Le norme di prevenzione e infortuni si applicano oltre che ai lavoratori subordinati anche ai titolari di contratti atipici?
2. Quali compiti ha il Responsabile della sicurezza prevenzione e protezione (RSPP)?
3. Quali sono i principali dispositivi di protezione individuale (DPI)?

2 PIANO DI EMERGENZA

Il piano di emergenza dell'azienda, previsto dal Testo unico sulla salute e la sicurezza nei luoghi di lavoro, deve essere redatto dall'RSPP e deve essere esposto in un apposito albo e portato a conoscenza del personale mediante apposite riunioni di informazione/formazione.

Nella prima parte il documento deve contenere: l'identificazione dell'azienda e i suoi principali riferimenti; le caratteristiche generali dell'edificio; le planimetrie delle aree interne ed esterne; la distribuzione e la localizzazione delle persone che operano nell'edificio; l'identificazione delle aree ad alta vulnerabilità al pericolo. Il documento deve proseguire classificando e descrivendo l'organizzazione che l'azienda ha creato per affrontare l'emergenza. Devono essere esplicitati gli obiettivi del piano; le modalità di informazione adottate; la classificazione delle emergenze messe in atto; la localizzazione del centro di coordinamento e le persone incaricate di formare la squadra prevenzione incendi, la squadra di evacuazione e la squadra di pronto soccorso. Il documento deve poi definire e descrivere in dettaglio le procedure di emergenza e di evacuazione, e assegnare compiti precisi a ogni componente delle squadre di emergenza e di evacuazione.

Devono pertanto essere nominati: un coordinatore dell'emergenza; un responsabile per ogni area di raccolta; un responsabile per la chiamata di soccorso; un responsabile per l'evacuazione in ogni locale dell'azienda; un responsabile per ogni piano dell'edificio; inoltre, in ogni ambiente, vanno individuate una persona che fa da aprifila e una da serrafila e una o più persone incaricate di aiutare le persone in stato di handicap (permanente o temporaneo).

L'edificio deve essere dotato, in posizione opportuna e adeguatamente segnalata, dei presìdi antincendio (estintori, nappe o idranti ecc.).

Obiettivi del piano

Il piano di emergenza deve:

— affrontare l'emergenza fin dal primo insorgere, per contenerne gli effetti sulle persone presenti nell'edificio;
— pianificare le azioni necessarie per proteggere le persone, sia da eventi interni sia da eventi esterni;
— coordinare i servizi di emergenza, le squadre di evacuazione e di soccorso;
— fornire una base informativa al personale abitualmente presente in azienda e alle persone temporaneamente presenti per vari motivi (clienti, fornitori, visitatori).

Il processo di informazione è importantissimo e deve essere sviluppato, oltre che con la pubblicazione del piano di emergenza in appositi albi, anche con incontri di informazione/formazione che istruiscano mediante fogli informativi o con audiovisivi tutto il personale sul comportamento da tenere in presenza di emergenze.

Norme di comportamento in base al tipo di emergenza

Il piano deve anche descrivere come le persone, dipendenti e non, che si vengono a trovare all'interno dell'edificio in caso di emergenza devono reagire e comportarsi.

Fig. 26.1
Cartello di segnalazione del punto di raccolta.

Le emergenze descritte riguardano:
— eventi interni, quali: incendio, segnalazione della presenza di un ordigno esplosivo, interruzione dell'alimentazione elettrica, fuga di gas, sversamento di liquidi, infortunio o malore e allagamento;
— eventi esterni, quali: incendio, evento sismico, attacco terroristico, alluvione ed emergenza tossica-nociva.

Il Centro di coordinamento

Al momento del verificarsi dell'emergenza si deve immediatamente e autonomamente costituire nell'edificio un luogo di raccolta definito e noto a tutti. In caso di evacuazione, il punto di raccolta deve essere identificato e segnalato con un cartello come quello mostrato nella ***figura 26.1***.

Il compito del Centro di coordinamento è di tenere i contatti con le autorità esterne e di richiederne l'intervento, se necessario, comunicando con tutti i punti di raccolta, raccogliendo informazioni e verificando, in caso di evacuazione, che tutte le persone abbiano abbandonato l'edificio.

Squadra di pronto soccorso

È formata da personale dell'azienda che ha seguito uno specifico corso di addestramento, mediante il quale sono stati abilitati a prestare le cure di primo soccorso e a utilizzare le attrezzature minime a disposizione nella cassetta di pronto soccorso (▸ ***Fig. 26.2***).

Fig. 26.2
Cassetta di Pronto soccorso.

Sistema di comunicazione

Il sistema di comunicazione delle emergenze impiega segnali sonori come una sirena o una campanella oppure un sistema vocale che diffonde messaggi preregistrati mediante altoparlanti, telefoni via cavo o radiotelefoni.

Se si utilizzano segnali sonori devono essere predisposti in posizione accessibile e facilmente individuabile. La segnalazione deve essere chiara e facilmente comprensibile dalle persone. Un segnale emesso ogni 2 secondi segnala l'inizio dell'emergenza, un segnale emesso ogni 10 secondi segnala la fine dell'emergenza, mentre un segnale continuo impone l'evacuazione totale dell'edificio.

La segnalazione tramite messaggi preregistrati deve essere chiara, breve e ripetuta fino alla completa evacuazione dell'edificio.

Qualsiasi sia il sistema adottato il Responsabile deve periodicamente accertarsi dello stato di funzionalità dell'impianto di segnalazione e deve verificare che lo stesso possa essere sentito e compreso in ogni locale dell'edificio.

Procedure di evacuazione

La squadra di evacuazione è composta da un coordinatore delle emergenze, dai responsabili dell'area di raccolta, da un responsabile della chiamata di soccorso e da vari responsabili dell'evacuazione dei locali dell'azienda, da personale aprifila e serrafila.

Alla ricezione del segnale di inizio emergenza il coordinatore dell'emergenza attiva gli altri componenti della squadra e si reca sul posto dell'evento per valutarne la gravità e adottare le immediate contromisure, se possibili.

Valutata la situazione e constatata la necessità di procedere all'evacuazione dell'edificio, si attiva la procedura: il coordinatore dell'emergen-

za si reca nel luogo prestabilito nel piano di emergenza per essere punto di riferimento per tutte le informazioni provenienti dai vari punti di raccolta e sovrintende a tutte le operazioni sia della squadra di emergenza interna sia degli enti di soccorso esterni; quando cessa l'emergenza dà il segnale di fine emergenza.

Se qualche persona non fosse reperibile, il coordinatore attiva le procedure di ricerca prendendo le informazioni a disposizione e comunicandole alle squadre di soccorso esterne.

Ogni punto di raccolta è un luogo sicuro individuato nel piano, tenendo conto delle diverse ipotesi di rischio; è indicato da appositi segnali ed è riportato sulle mappe distribuite nei locali e nei corridoi dell'edificio (giardini protetti, cortili non chiusi, parcheggi a cielo aperto, prati, piazze chiuse al traffico ecc.).

Un responsabile è incaricato di verificare che tutte le persone che dovrebbero recarsi in quello specifico punto di raccolta, siano presenti e non abbiano bisogno di aiuto. Il responsabile deve segnalare immediatamente al Centro di coordinamento i nominativi del personale mancante o la richiesta di aiuto, in modo che sia possibile cercare le persone assenti negli altri centri di raccolta oppure di attivare la ricerca all'interno dell'edificio, se possibile. Per far ciò è necessario predisporre appositi moduli che contengano i nominativi del personale in servizio ogni giorno.

La chiamata agli enti di soccorso esterni viene fatta dal responsabile appositamente nominato dal Coordinatore. I principali numeri di emergenza, attivi in Italia, sono elencati nella ***tabella 26.2***.

Fig. 26.3
Segnali per indicare la direzione della via di fuga.

In caso di emergenza, il personale deve abbandonare i locali, interrompendo tutte le attività e abbandonando i beni personali; deve uscire ordinatamente incolonnandosi dietro l'aprifila, deve procedere in fila indiana tenendo una mano sulla spalla di chi precede, senza spingersi e senza correre; deve dirigersi verso il punto di raccolta seguendo le vie di fuga previste (percorsi indicati dall'apposita segnaletica di forma quadrata o rettangolare con pittogrammi bianchi su fondo verde (▸ ***Fig. 26.3***) e sulle planimetrie diffuse per tutti i locali e i corridoi dell'edificio).

Le planimetrie (▸ ***Fig. 26.4***) mostrano l'ubicazione delle uscite di emergenza e dei luoghi sicuri; segnalano con un'apposita colorazione il percorso della via di fuga; l'ubicazione delle attrezzature antincendio; la posizione delle aree di raccolta esterne (colorate o con una lettera), la posizione della segnaletica di sicurezza; la posizione dei locali potenzialmente

Tabella 26.2 Numeri telefonici dei principali enti esterni di pronto intervento

ENTI ESTERNI DI PRONTO SOCCORSO

Pronto soccorso	118
Vigili del fuoco	115
Polizia	113
Carabinieri	112
Enel	511181
Centro antiveleni (Milano)	02-66101029

Fig. 26.4
Planimetria dell'edificio indicante il percorso delle vie di fuga.

pericolosi presenti nel piano; la posizione dei quadri elettrici di piano e generale; la posizione delle chiusure di gas metano; la posizione del rubinetto di chiusura dell'erogazione dell'acqua.

L'ultima persona che esce dal locale, il serrafila, ha l'incarico di verificare che non sia rimasto nessuno e che eventuali persone in stato di handicap siano state aiutate ad allontanarsi dal locale stesso; provvede infine a chiudere la porta, e la porta chiusa indica che nessuno è rimasto nel locale. Il responsabile deve, inoltre, accertarsi che nessuno utilizzi gli ascensori e i percorsi non di sicurezza.

In caso di **incendio**, se la via di fuga è invasa dal fumo, ma è ancora percorribile, è necessario camminare chinati premendo un fazzoletto, possibilmente bagnato, sulla bocca. Se, invece, il fumo preclude la via di fuga, non uscire dal locale, ma sigillare ogni fessura della porta utilizzando il materiale disponibile (per esempio degli indumenti bagnati), e segnalare all'esterno la propria presenza.

In caso di segnalazione della presenza di un **ordigno esplosivo**, non avvicinarsi all'oggetto, non tentare di individuarlo, né di rimuoverlo. Dare l'allarme per far evacuare l'edificio e avvisare le forze dell'ordine, i Vigili del fuoco e il Pronto soccorso.

In caso di emergenza per **scossa sismica** il responsabile deve valutare immediatamente se dare il segnale di evacuazione generale, facendo interrompere all'istante l'erogazione dell'energia elettrica e del gas. Duran-

te il sisma è opportuno proteggersi riparandosi sotto scrivanie, tavoli o in corrispondenza di architravi precedentemente individuate e segnalate.

In caso di emergenza per **nube tossica** proveniente dall'esterno, è necessario conoscere la durata del rilascio ed evacuare solo in caso di assoluta necessità. Il coordinatore deve immediatamente attivarsi e contattare gli enti esterni per coordinarsi con essi, disattivando l'erogazione dell'energia elettrica se si teme che il gas possa esplodere. Nei locali è necessario chiudere le finestre, tutti i sistemi di ventilazione e le prese d'aria, sigillare le finestre con indumenti bagnati e far stendere il personale a terra con un fazzoletto bagnato sul naso.

Squadra di emergenza per la prevenzione degli incendi

L'incendio è una reazione chimica di combustione che avviene quando sono presenti i tre elementi che compongono il cosiddetto triangolo del fuoco: il combustibile (carta, legno, idrocarburi, oli ecc.), il comburente (aria, ossigeno ecc.) e il calore necessario per portare il combustibile alla temperatura di accensione.

Per prevenire un incendio, bisogna rispettare alcune semplici norme di comportamento:

— i materiali infiammabili devono essere isolati e segregati in idonee zone ventilate;
— gli ambienti di lavoro devono essere ordinati e puliti;
— le bombole di gas combustibili non devono essere esposte a fonti di calore;
— non si devono utilizzare fiamme libere e non si deve fumare nei pressi di sostanze combustibili;
— è necessario bloccare la perdita di sostanze infiammabili e ogni versamento;
— effettuare lavori "a caldo" solo se si sono adottate le necessarie precauzioni;
— gli impianti elettrici devono essere attentamente vigilati e i cavi elettrici devono essere integri;
— le apparecchiature elettriche non devono sovraccaricare le prese; si deve evitare, per quanto possibile, l'utilizzo di ciabatte, spine multiple e cavi volanti e si deve staccare la spina dalla presa ogniqualvolta si ha un dubbio sul perfetto funzionamento dell'apparecchiatura;
— non si devono usare apparecchi non omologati o in pessime condizioni;
— non si devono svuotare i portacenere nel cestino della carta;
— controllare e vigilare sul surriscaldamento delle apparecchiature elettriche (trasformatori, motori ecc.), verificando che la ventilazione non sia ostacolata o impedita (panni appoggiati sui motori, apparecchiature e strumenti accatastati uno sull'altro ecc.).

L'edificio deve essere dotato, in posizione opportuna e adeguatamente segnalata dei presidi antincendio, di manichette, naspi o idranti connessi all'impianto idraulico, che deve essere progettato per erogare rapidamente grandi quantità di acqua; di estintori che erogano sostanze estinguenti a schiuma, a polvere, a CO_2, a idrocarburi alogenati (Halon). Questi presidi devono essere ispezionati periodicamente per valutarne l'efficienza e l'affidabilità. Nella ***tabella 26.3*** sono elencate le caratteristiche e gli effetti delle sostanze estinguenti sul corpo umano.

Tabella 26.3 Caratteristiche delle sostanze utilizzate per estinguere gli incendi

SOSTANZA	CARATTERISTICHE		EFFETTI SUL CORPO UMANO
Anidride carbonica (CO_2)	Non particolarmente efficace. Richiede un'abbondante erogazione. Ha un costo moderato e viene utilizzata in mezzi di estinzione fissi a saturazione d'ambiente e mobili. Gli estintori portatili sono pesanti a causa della robustezza richiesta dalla elevata pressione di conservazione allo stato liquido. Durante l'erogazione a pressione atmosferica si raffredda energicamente		Possibilità di ustioni da freddo per contatto durante l'erogazione. Se utilizzato in locali angusti o in impianti fissi a saturazione vi è il pericolo di asfissia
Polvere	Costo e prestazioni molto variabili a seconda del tipo e della quantità impiegata. Esistono tipi adatti per qualsiasi classe di fuoco	Tipo BC Tipo ABC (polivalente) Per metalli	Se utilizzato in locali angusti o spruzzato direttamente sulle persone provoca irritazione agli occhi, alle vie respiratorie e in qualche caso dermatosi
Idrocarburi alogenati (Halon)	Molto efficace anche con erogazioni limitate. È molto costoso	Halon 1301-1211 (aerare i locali dopo l'uso in ambienti chiusi) Halon 2402 (impiegare solo all'aperto)	Ha effetti reversibili di tipo anestetico e sul ritmo cardiaco. Si formano sostanze tossiche per decomposizione termica

Un approfondimento della norma relativa alla gestione degli estintori e alla loro manutenzione è scaricabile dal sito Internet.

La squadra di emergenza per la prevenzione degli incendi è costituita da personale abilitato, in seguito a uno specifico corso di addestramento attestato dai Vigili del Fuoco, allo spegnimento e all'uso dei mezzi di estinzione. Al verificarsi dell'evento, la squadra si riunisce prontamente in uno specifico punto di raccolta dove trova e indossa i dispositivi di protezione individuale previsti dalla normativa (caschi, indumenti, occhiali, guanti ecc.). A questo punto decide quale mezzo di estinzione impiegare e tenta di spegnere l'incendio o di circoscriverne gli effetti, ritardandone la propagazione in attesa dell'intervento dei Vigili del Fuoco.

Le attrezzature antincendio sono segnalate da cartelli con pittogrammi in bianco su fondo rosso (▸ ***Fig. 26.5***). Gli estintori (▸ ***Fig. 26.6***) sono conservati su carrelli o in contenitori di colore rosso (▸ ***Fig. 26.7***) dotati di chiusura frangibile. Appositi cartelli forniscono informazioni sul comportamento che le persone devono tenere in caso di incendio e sull'uso degli estintori (▸ ***Fig. 26.8***).

Se l'incendio è di **ridotte proporzioni** almeno un operatore della squadra interviene utilizzando l'estintore più vicino, mentre un altro operatore si procura un secondo estintore predisponendolo per l'utilizzo, tenendolo a distanza di sicurezza dal fuoco, ma facilmente accessibile all'operatore che sta agendo sul fuoco. La squadra deve allontanare le persone presenti e compartimentare la zona dell'incendio chiudendo le porte

Fig. 26.5
Cartelli di segnalazione per gli estintori.

26.5

Fig. 26.6
Estintori (di colore rosso).

26.6

Fig. 26.7
Cassetta per estintori con vetro frangibile (di colore rosso).

26.7

Fig. 26.8
Istruzione sul comportamento da tenere in caso di incendio.

26.8

tagliafuoco e rimovendo i materiali infiammabili e combustibili, in modo da circoscrivere l'incendio e ritardarne la propagazione.

L'estintore va utilizzato compiendo, da distanza opportuna, una prima erogazione a ventaglio della sostanza estinguente al fine di poter avanzare e poter agire sul fuoco più da vicino; il getto va diretto alla base della fiamma, agendo in modo progressivo partendo dalle fiamme vicine per poi spostarsi verso il centro, facendo attenzione a non sprecare le sostanze estinguenti.

Durante le operazioni i membri della squadra devono proteggere gli occhi con gli occhiali e le vie respiratorie con una maschera, se in dotazione, oppure con un fazzoletto bagnato. Durante le operazioni è utile aprire le finestre per tenere bassa la temperatura dell'aria e impedire che raggiunga valori tali da infiammare altri materiali e per far fuoriuscire fumo e gas responsabili di possibili intossicazioni.

Se l'incendio assume **vaste proporzioni** bisogna chiamare immediatamente i Vigili del Fuoco ed evacuare l'edificio. Si deve interrompere l'erogazione dell'energia elettrica e del gas il più possibile a monte degli

Fig. 26.9
Naspi antincendio.

impianti, compartimentare, mediante le porte tagliafuoco, le zone circostanti l'incendio, utilizzare i naspi antincendio (nastri arrotolati collegati all'impianto idraulico antincendio situati in appositi contenitori dislocati in vari punti segnalati dell'edificio, ▸ ***Fig. 26.9***) e allontanare i materiali infiammabili, per quanto possibile.

A incendio domato è necessario aerare i locali per eliminare gas e vapori, accertarsi che non vi siano focolai nascosti o braci, far controllare i locali per verificarne l'agibilità per appurare che l'incendio non abbia arrecato danni alla struttura dell'edificio.

Durante la fase di intervento, è necessario prestare attenzione alle vetrate che possono esplodere proiettando frammenti pericolosi. Se una persona è avvolta dalle fiamme utilizzare grandi quantità d'acqua oppure avvolgerla in coperte o indumenti per soffocare le fiamme.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Chi redige il piano d'emergenza dell'azienda?
2. Quali sono le principali caratteristiche del piano d'emergenza?
3. Quali sono le procedure di evacuazione di un edificio in caso di emergenza?
4. Quali sono le procedure che bisogna adottare in caso di incendio?
5. Che cosa si deve fare se si verifica una scossa sismica?
6. Come si deve utilizzare un estintore?

3 SEGNALETICA DI SICUREZZA

La segnaletica di sicurezza assolve, nel modo più semplice, immediato e sintetico, il compito di informare i lavoratori sui rischi presenti e sui sistemi di prevenzione e protezione in atto.

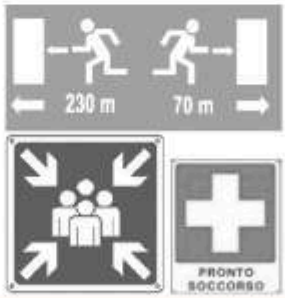
La mancanza di un'adeguata segnaletica aumenta i pericoli all'interno del luogo di lavoro, in quanto priva i lavoratori della modalità più rapida e sintetica di informazione sui pericoli e sui modi per evitarli e contrastarli. È quindi importante che tutti sappiano leggere la segnaletica e la sappiano correttamente interpretare. Le varie tipologie di segnaletica di sicurezza sono elencate nella ***tabella 26.4***.

I segnali di divieto mostrano le azioni e i comportamenti che sono assolutamente da evitare (vietato fumare, vietato usare fiamme libere ecc.). I segnali di pericolo informano i lavoratori dei pericoli presenti (materiale radioattivo, carichi sospesi, sostanze corrosive ecc.). I segnali di obbligo o prescrizione indicano quali dispositivi di protezione individuali devono essere indossati o utilizzati (guanti, occhiali, cuffie ecc.). I segnali di informazione indicano i dispositivi di emergenza e di soccorso (scale antincendio, uscite di sicurezza, vie di fuga ecc.).

4 PRONTO SOCCORSO AZIENDALE

Il Decreto legislativo 15 luglio 2003, n. 388 (pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 27 del 3 febbraio 2004) ha stabilito l'obbligo per le aziende di dotarsi di cassette di pronto soccorso (▸ ***Fig. 26.2***, a p. 442).

Tabella 26.4 Tipologia dei segnali

SIGNIFICATO DEL SEGNALE	FORMA E COLORE	ESEMPIO
Divieto	Circolare con bordo rosso e barra trasversale rossa su fondo bianco	
Pericolo	Triangolo equilatero a fondo giallo con bordo e simbolo nero	
Obbligo o prescrizione	Circolare con colori blu e bianco	
Informazione	Quadrato di colore verde e bianco	

Le aziende devono ottemperare a quest'obbligo in modo diverso; secondo la tipologia di attività svolta, il numero dei lavoratori occupati e i fattori di rischio sono classificate in **tre gruppi**.

Il **Gruppo A** è composto da aziende o unità produttive con attività industriali, centrali termoelettriche, impianti e laboratori nucleari, aziende estrattive e altre attività minerarie, imprese che effettuano lavori in

sotterraneo, aziende per la fabbricazione di esplosivi, polveri e munizioni; aziende con oltre cinque lavoratori appartenenti alla tipologia con un indice infortunistico di inabilità permanente superiore a quattro, desumibile dalle statistiche nazionali Inail relative al triennio precedente e aggiornate al 31 dicembre di ciascun anno; con aziende con oltre cinque lavoratori a tempo indeterminato del comparto dell'agricoltura.

Il **Gruppo B** è composto da aziende o unità produttive con tre o più lavoratori che non rientrano nel gruppo A.

Il **Gruppo C** è composto da aziende o unità produttive con meno di tre lavoratori che non rientrano nel gruppo A.

Il datore di lavoro, sentito il medico competente, se previsto, identifica la categoria di appartenenza della propria azienda o unità produttiva e, solo nel caso appartenga al gruppo A, comunica tale appartenenza all'Azienda Sanitaria Locale competente sul territorio in cui si svolge l'attività lavorativa, per la predisposizione degli interventi di emergenza del caso. Nel caso in cui l'azienda svolga un'attività lavorativa compresa in gruppi diversi, il datore di lavoro deve riferirsi all'attività con indice più elevato.

Organizzazione di pronto soccorso

Nelle aziende o unità produttive di gruppo A e di gruppo B, il datore di lavoro deve garantire le seguenti attrezzature:

— cassetta di pronto soccorso, tenuta presso ciascun luogo di lavoro, adeguatamente custodita in un luogo facilmente accessibile e individuabile con segnaletica appropriata, contenente la dotazione minima indicata nella ***tabella 26.5***; va integrata in base a una valutazione dei rischi presenti nei luoghi di lavoro e su indicazione del medico competente, se previsto, e del sistema di emergenza sanitaria del Servizio sanitario nazionale, e della quale sia costantemente assicurata la completezza e il corretto stato d'uso dei presìdi in essa contenuti; la cassetta deve essere mantenuta pulita e ripristinata dopo ogni utilizzo, deve essere di colore bianco con la croce bianca su fondo verde, facilmente visibile e accessibile a chiunque; i presìdi con scadenza devono essere controllati almeno ogni 6 mesi e rinnovati qualora risultino scaduti;
— un mezzo di comunicazione idoneo ad attivare rapidamente il sistema di emergenza del Servizio sanitario nazionale (118).

Il datore di lavoro è tenuto a garantire il raccordo tra il sistema di pronto soccorso interno e il sistema di emergenza sanitaria. Nelle aziende con lavoratori che prestano la propria attività in luoghi isolati, diversi dalla sede aziendale, il datore di lavoro è tenuto a fornire loro il pacchetto di medicazione minimo e un mezzo di comunicazione idoneo per raccordarsi con l'azienda al fine di attivare rapidamente il sistema di emergenza del Servizio sanitario nazionale e a individuare uno o più lavoratori, specificamente addestrati, incaricati dell'attuazione dei provvedimenti di primo soccorso.

I lavoratori devono essere addestrati a non perdere la calma e ad avvertire, se necessario, i presìdi esterni prestando le prime cure all'infortunato, nei limiti dell'addestramento ricevuto.

L'infortunato deve sempre farsi medicare, anche per infortuni di lieve entità che possono sempre degenerare in gravi conseguenze (tetano, emorragie ecc.), e deve, per poter accedere ai benefici assicurativi, far

Tabella 26.5 Contenuto minimo della cassetta di pronto soccorso (Allegato 1 al D.Lgs. n. 388 del 15/07/2003)

LA CASSETTA DI PRONTO SOCCORSO PER AZIENDE CON PIÙ DI 3 DIPENDENTI, DI CUI ALL'ART. 15, COMMA 3, DEL DECRETO LEGISLATIVO 19 SETTEMBRE 1994, N. 626, DEVE CONTENERE ALMENO:

1) Guanti sterili monouso (5 paia)
2) Visiera paraschizzi
3) Flacone di soluzione cutanea di iodopovidone al 10% di iodio da 1itro (1)
4) Flaconi di soluzione fisiologica (sodio cloruro-0,9%) da 500 ml (3)
5) Compresse di garza sterile 10 x 10 in buste singole (10)
6) Compresse di garza sterile 18 x 40 in buste singole (2)
7) Teli sterili monouso (2)
8) Pinzette da medicazione sterili monouso (2)
9) Confezione di rete elastica di misura media (1)
10) Confezione di cotone idrofilo (1)
11) Confezioni di cerotti di varie misure pronti all'uso (2)
12) Rotoli di cerotto alto cm 2,5 (2)
13) Un paio di forbici
14) Lacci emostatici (3)
15) Ghiaccio pronto uso (2 confezioni)
16) Sacchetti monouso per la raccolta di rifiuti sanitari (2)
17) Termometro
18) Apparecchio per la misurazione della pressione arteriosa

sempre registrare l'infortunio entro 24 ore dall'evento. Il responsabile della struttura deve assicurarsi che la procedura di registrazione sia effettuata nei tempi previsti.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Dotarsi delle cassette di Pronto soccorso è un obbligo per le aziende?
2. Chi stabilisce il fattore di rischio attribuito all'azienda?
3. Quali sono le tipologie dei segnali?
4. Quali sono le attrezzature di cui deve dotarsi un'azienda produttiva appartenente al gruppo A?
5. Di quali presìdi devono essere dotati i lavoratori che operano lontano dalla sede dell'azienda in luoghi isolati?

5 IL MOBBING

Negli ultimi anni ha trovato tutela il maltrattamento psicologico dei lavoratori, il cosiddetto mobbing.

Il mobbing si ha quando, sul posto di lavoro, si crea una situazione per

la quale uno (o più lavoratori) subiscono in modo continuativo, con parole e comportamenti, atti di maltrattamento fisico o psicologico, finalizzati a danneggiare le vittime, costringendole talvolta anche a lasciare il lavoro.

Sono stati proposti sette criteri per capire se un atteggiamento ostile può rientrare nella categoria del mobbing:

1. deve aver luogo sul posto di lavoro;
2. ci deve essere un aggressore e una vittima;
3. deve esserci l'intento persecutorio;
4. le azioni ostili si devono ripetere almeno alcune volte al mese;
5. il conflitto deve essere in corso da almeno 6 mesi;
6. ci deve essere una progressione dall'aggressione ai danni psico-fisici causati;
7. deve contenere almeno due dei seguenti parametri: violenza; isolamento sistematico; modifica delle mansioni: inferiori o umilianti; attacchi alla reputazione; attacchi nelle relazioni interpersonali.

Sulla base del D. lgs. n. 38/2000 e della sentenza della Corte costituzionale (n. 179/1988), l'Inail riconosce il mobbing come malattia professionale. Il mobbing costituisce per chi lo esercita un illecito civile e non penale. Dal punto di vista penale sono rilevanti le fattispecie a esse associate: le lesioni personali, i maltrattamenti, la violenza sessuale, l'ingiuria (offesa all'onore e al decoro), la diffamazione (offesa alla reputazione resa pubblica).

Sotto il profilo civilistico sono violazioni previste dal Codice civile, che impone al datore di lavoro di prendere le misure necessarie per tutelare l'integrità fisica e la personalità morale (art. 2087 del Codice civile) del lavoratore, e dallo Statuto dei lavoratori, che impone al datore di lavoro di non discriminare i lavoratori, né di dequalificarli. L'onere della prova grava sul lavoratore.

L'azienda risponde insieme al responsabile, se questi non ha attivato opportune misure di prevenzione.

La vittima può richiedere il risarcimento degli eventuali danni patrimoniali e, se avesse perso il posto di lavoro a causa di mobbing, il reintegro nel posto di lavoro ai sensi dell'art. 18 dello Statuto dei lavoratori. Si possono richiedere anche i danni non patrimoniali per danno alla vita, danno sociale, esistenziale, morale e biologico.

6 IL CODICE DELLA PRIVACY E LE MISURE MINIME DI SICUREZZA

Il termine inglese *privacy*, ormai diffusissimo anche in Italia, può essere utilizzato con diversi significati che rimandano alla segretezza, riserbo, intimità.

Il Decreto legislativo n. 96 del 30 giugno 2003 "*Codice in materia di protezione dei dati personali*" tende a utilizzare tutti questi significati. Esso si occupa della riservatezza della sfera privata dell'individuo e tutela il diritto di controllare l'uso e la circolazione dei dati personali.

Negli anni, nella nostra società, si è avuta una progressiva evoluzione del concetto di dignità della persona che ha avuto come effetto il verificarsi di un significativo ampliamento del diritto alla riservatezza e la conseguente necessità di tutelare i dati personali. Il nuovo Codice dà attua-

zione all'art. 3 della Costituzione che sancisce il "controllo" delle informazioni quale diritto individuale e assoluto dell'individuo.

Il Codice della privacy si articola in tre parti:

1. disposizioni generali (dall'art. 1 all'art. 45),
2. disposizioni relative a settori specifici (dall'art. 46 all'art. 140),
3. tutele amministrative e penali (dall'art. 141 all'art. 186),

e possiede tre allegati:

— Allegato A – codici deontologici;
— Allegato B – disciplinare tecnico in materia di misure minime di sicurezza;
— Allegato C – disciplinare tecnico per i trattamenti non occasionali.

Il trattamento dei dati personali deve avvenire:

- nel rispetto dei diritti e delle libertà fondamentali;
- in regime di semplificazione; le procedure devono essere snellite e i diritti di accesso ai dati devono essere chiaramente definiti;
- per necessità; i titolari del trattamento dati devono utilizzare soltanto i dati indispensabili, riducendo al minimo l'utilizzo di dati personali e identificativi, quando le finalità perseguite possono essere realizzate in altro modo, per esempio con dati anonimi o con modalità che non consentano di correlare i dati raccolti con l'interessato;
- con una finalità; gli scopi di una raccolta dati devono essere ben definiti, espliciti e legittimi e non devono essere trattati in modo incoerente con le funzioni istituzionali del titolare;
- in modo lecito, cioè deve essere previsto da norme di legge o regolamentari;
- con proporzionalità, pertinenza e non eccedenza. I dati devono essere adeguati, pertinenti e non eccedenti rispetto alle finalità della raccolta e del trattamento. Il trattamento dati deve, pertanto, non essere eccessivamente intrusivo nella sfera personale dell'individuo. Gli ultimi due aspetti, la pertinenza e la non eccedenza, hanno particolare rilievo quando il titolare del trattamento richiede un accesso ai dati personali, sensibili o giudiziari, da parte di una persona diversa dal richiedente. In questo caso il titolare o il responsabile può decidere la comunicazione totale o parziale dei dati, verificando se il diritto che il richiedente vuol far valere e "pari rango" con quello del diritto alla privacy da tutelare.

Si ricorda che i dati ottenuti in violazione dei diritti garantiti dal codice non possono essere utilizzati.

I soggetti obbligati e interessati dal Codice della privacy

Al processo di trattamento dati partecipano due tipologie di soggetti: quelli obbligati e il soggetto interessato.

I soggetti obbligati sono:

- il titolare del trattamento dati, cioè chi esercita il potere decisionale autonomo sulle finalità e sulle modalità del trattamento, anche sotto il profilo della sicurezza (per esempio nelle scuole, il Dirigente scolastico);
- il responsabile del trattamento dati, che viene nominato dal titolare individuandolo in base all'esperienza, capacità e affidabilità e che sap-

pia fornire idonee garanzie del rispetto delle norme vigenti (viene nominato per iscritto con un apposito provvedimento che ne definisce i compiti);
- gli incaricati, sono tutti coloro che in ragione del loro ufficio o servizio, dipendenti e non dipendenti, svolgono operazioni su dati detenuti presso il titolare

Per **trattamento dati** si intende qualunque operazione o complesso di operazioni effettuate con o senza l'ausilio di strumenti elettronici, che riguardano la raccolta, la registrazione, l'organizzazione, la conservazione, la consultazione, l'elaborazione, la modificazione, la selezione, l'estrazione, il raffronto, la cancellazione e la distruzione di dati sia registrati sia non registrati in una base dati.

Quando si effettua una raccolta dati è necessario consegnare all'interessato l'informativa, che descrive le finalità e le modalità del trattamento cui sono destinati i dati, la natura obbligatoria o facoltativa del conferimento dei dati stessi, le conseguenze di un eventuale rifiuto di rispondere, i soggetti e le categorie che potranno utilizzare i dati raccolti e gli ambiti di diffusione, i dati identificativi del titolare e dei responsabili del trattamento dati.

I dati che sono oggetto di trattamento sono classificati in:
- dati personali, quelli relativi a persona fisica, persona giuridica, ente o associazione, identificati o identificabili (età, professione, residenza, numeri di telefono ecc.);
- dati identificativi, che permettono l'identificazione della persona (cognome, nome, ragione sociale);
- dati sensibili, quelli idonei a identificare l'origine razziale ed etnica, le convinzioni religiose o filosofiche, l'adesione a partiti politici o a organizzazioni sindacali, lo stato di salute, la vita sessuale;
- dati giudiziari, quelli idonei a rivelare provvedimenti giudiziari o amministrativi, o la qualità di indagato o imputato;
- dato anonimo, quelli che già in origine per le modalità di raccolta o per trattamento successivo non sono associabili a una specifica persona.

Quando i dati sono riferiti a una qualità o situazione di un individuo devono essere tutelati. Particolare attenzione va prestata ai dati sensibili e giudiziari che devono essere trattati con misure di sicurezza e sottoposti a vincoli di accesso maggiori rispetto ai dati ordinari.

Gli strumenti utilizzabili nel trattamento dati possono essere di tipo elettronico o non elettronico (schedari, archivi, registri, fascicoli dei dipendenti, documentazione contabile ecc.).

Nel trattamento dati **con strumenti elettronici** ogni incaricato deve essere fornito di una procedura di autenticazione informatica (nome utente e password), di un sistema di gestione automatico dell'accreditamento, di un aggiornamento periodico degli accreditamenti. Gli strumenti elettronici, inoltre, devono essere protetti dalla possibile perdita dei dati per cui si devono predisporre procedure che generino copie di sicurezza (backup) in modo automatico e non automatico. I dati vanno conservati, in modo idoneo, in locali differenti da quelli in cui normalmente vengono utilizzati. Alcuni documenti, quali quelli riguardanti lo stato di salute o la vita sessuale, possono anche essere sottoposti a tecniche di cifratura.

Il trattamento dati **senza l'ausilio di strumenti elettronici** avviene secondo delle istruzioni, fornite in forma scritta, agli incaricati. Tali indicazioni riguardano il controllo e la custodia, per l'intero ciclo di svolgimento delle operazioni di trattamento, degli atti e dei documenti contenenti dati personali.

I documenti che contengono dati sensibili o giudiziari devono essere custoditi in modo che non siano accessibili a persone prive di autorizzazione, per esempio in locali custoditi o in armadi blindati ad accesso controllato.

La tutela della riservatezza delle persone rispetto al trattamento dei dati personali è un diritto assoluto e inviolabile meritevole quando viene violato di sanzioni sia civili sia penali.

L'art. 2050 del Codice civile precisa che: "*chiunque cagiona ad altri (un danno) nello svolgimento di un'attività pericolosa, per sua natura o per la natura dei mezzi adoperati, è tenuto al risarcimento se non prova di aver adottato tutte le misure idonee ad evitare il danno*":

Nei confronti del titolare del trattamento dati vige la presunzione di colpa dalla quale può liberarsi solo dimostrando di aver adottato tutte le misure idonee a evitare il danno e riferibili allo stato attuale di conoscenza tecnico-scientifica.

Per l'aspetto penale si deve distinguere per fattispecie a carattere omissivo e/o doloso. Affinché si configuri l'ipotesi di violazione deve esserci la volontà consapevole e cosciente di arrecare ad altri un danno e/o di trarre profitto dal trattamento illecito realizzato. Sono particolarmente rilevanti:

— la non applicazione delle disposizioni di legge relative;
— la non consegna dell'informativa all'interessato;
— l'omessa adozione delle misure di sicurezza;
— l'inosservanza delle disposizioni previste dallo Statuto dei lavoratori;
— la violazione dei divieti di comunicazione e diffusione dei dati;
— le false dichiarazioni al Garante della privacy;
— la cessione illegittima dei dati;
— il trattamento di dati senza il prescritto consenso.

Le misure minime di sicurezza

Il Codice della privacy prescrive l'adozione di una serie di "minime misure di sicurezza" di contenuto tecnico, informatico, organizzativo e logistico che hanno lo scopo di tutelare i dati personali; queste misure devono assicurare un livello sufficiente di protezione dei dati personali trattati.
Chiunque esegua un trattamento di dati personali deve rendere minimi i rischi di distruzione o di perdita degli stessi, deve evitare accessi ai dati non autorizzati e non deve porre in atto trattamenti non autorizzati o non conformi alle finalità di raccolta.

Il titolare del trattamento deve attivare tutti quegli accorgimenti operativi che la tecnica e l'esperienza prevedono e attenersi alle disposizioni previste nell'allegato B della legge sulla privacy. L'allegato B elenca, in dettaglio, tutti gli adempimenti da rispettare.

Le misure minime di sicurezza devono essere applicate sia ai dati registrati su supporti cartacei sia a quelli trattati con supporti informatici.

È necessario individuare le persone incaricate della gestione dei dati personali indicando per ciascuna l'ambito di trattamento loro consentito e fornendo loro un codice identificativo (login) e una password, che dovrà

essere composta da almeno otto caratteri, nota al solo soggetto che se ne deve servire e che verrà, periodicamente, rinnovata.

All'interno dell'organizzazione va individuata una figura preposta alla conservazione di tali credenziali (il custode delle password) al fine di permettere, se necessario, di accedere, in qualsiasi momento, alle banche dati da parte delle persone accreditate e autorizzate.

Gli incaricati del trattamento dati hanno il dovere e il diritto di ricevere un'adeguata formazione in merito alle tecniche di salvataggio dei dati e ad avere precise e corrette informazioni sul corretto utilizzo di login e password, inoltre non devono mai lasciare incustodito il sistema informatico quando è attivo ma, se si allontanano, devono chiudere le applicazioni in uso.

I software in uso devono essere sistematicamente aggiornati e i programmi di protezione dalla pirateria informatica (antivirus, firewall ecc.) vanno aggiornati almeno semestralmente. Queste scadenze devono essere dimezzate se i dati custoditi nel sistema informatico riguardano dati sensibili o giudiziari.

Il salvataggio e il backup dei dati deve essere fatto almeno una volta la settimana, mentre è opportuno effettuare giornalmente il salvataggio dei dati oltre che nel sistema informatico anche su supporti esterni, che poi devono essere opportunamente custoditi (cassaforte, armadi blindati chiusi a chiave ecc.) in locali diversi da quelli in cui è situato il sistema informatico.

Un ulteriore importante adempimento previsto dalla legge è la redazione e l'aggiornamento, entro il 31 marzo di ogni anno, del **Documento programmatico della sicurezza** (DPS). Il DPS, partendo dall'analisi dei rischi insiti nell'organizzazione aziendale, prevede tutte le possibili contromisure volte a eliminarli, e testimonia il costante adeguamento del livello di sicurezza adottato a protezione dei dati personali.

Anche il Codice della privacy, come quello della sicurezza sui luoghi di lavoro, pone uno speciale risalto sulla formazione del personale, e chiede al titolare del trattamento dati una particolare attenzione per questo aspetto del rischio e la costante ricerca di una diffusione puntuale delle informazioni e della crescita della cultura della privacy.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Quando si ha una situazione di mobbing?
2. Un litigio sul luogo di lavoro può essere considerato mobbing?
3. Che cosa si intende per trattamento dati?
4. Come devono essere trattati i dati personali?
5. Quali sono i dati sensibili e come devono essere trattati?
6. Che cosa deve contenere il Documento programmatico della sicurezza (DPS)?

SINTESI DEL MODULO M

CAPITOLO 22

I principali tipi di contratti sono: lavoro a tempo indeterminato, lavoro a tempo determinato (o a termine), lavoro part-time, lavoro stagionale, contratto di inserimento, apprendistato, lavoro interinale o a somministrazione, lavoro intermittente o a chiamata (job on call), stage o tirocinio, socio di cooperativa, coadiuvante familiare, collaborazione coordinata e continuativa (co.co.co.), lavoro a progetto (co.co.pro.), collaborazione occasionale, collaborazione con partita Iva.

– Il **lavoro a tempo indeterminato** è il contratto normale previsto dalla Legge n. 247/2007. Il contratto prevede un periodo di prova.

– Il **lavoro a tempo determinato** (o a termine) è un contratto che pone un termine alla durata del contratto stesso. Si può applicare per ragioni di carattere tecnico, produttivo, organizzativo o sostitutivo riferibile anche all'ordinaria attività del datore di lavoro.

I contratti di lavoro prevedono anche la possibilità di stipulare **contratti a tempo parziale** (part-time) per un numero di ore di lavoro inferiore a quello stabilito nei contratti di lavoro nazionali. Il part-time può essere orizzontale o verticale.

– Il **lavoro interinale o in somministrazione** è un tipo di contratto che viene utilizzato quando un'azienda, dovendo svolgere un determinato lavoro, non si avvale del proprio personale dipendente ma utilizza lavoratori presi "in affitto" da agenzie specializzate e autorizzate dal ministero del Lavoro.

– L'**apprendistato** è un contratto con il quale il datore di lavoro si impegna a fornire al giovane, nell'azienda e fuori da essa, non solo il lavoro ma anche gli insegnamenti che gli consentono di conseguire una qualifica professionale.

– Il **contratto a progetto** prevede l'indicazione del progetto, cioè un'attività produttiva ben individuabile e determinabile nella prestazione lavorativa e collegabile con un risultato finale. Il lavoratore deve poter svolgere la sua attività in modo autonomo seppure in collaborazione con il committente.

– Il **lavoro accessorio** può essere svolto da pensionati, da studenti e da altre categorie di persone. Le attività che possono essere svolte sono: piccoli lavori domestici, baby sitter, cura degli anziani, giardinaggio, lezioni private, pulizia, collaborazioni con maneggi e scuderie, vendemmia, raccolta di pomodori, collaborazioni con associazioni di volontariato, consegna porta a porta e vendita ambulante di stampa quotidiana e periodica**.**

– Il **lavoro a intermittenza o a chiamata** (job on call) può essere stipulato solo per brevi periodi e in forma intermittente, su richiesta del datore di lavoro e deve essere richiesto almeno con un giorno di preavviso.

– Il **tirocinio formativo o stage** presuppone una convenzione tra un ente formatore e un'azienda pubblica o privata che offre al lavoratore un periodo di tirocinio formativo o stage.

– Il **socio lavoratore** fa parte, per esempio, di una cooperativa per la quale egli presta il proprio lavoro. Il rapporto di lavoro è determinato dal regolamento che le cooperative devono depositare presso la Direzione provinciale del lavoro. Se manca il regolamento il rapporto di lavoro è del tipo subordinato.

– Il contratto sottoscritto dagli **associati in partecipazione** prevede che l'imprenditore (associante) attribuisca al lavoratore (associato) una partecipazione agli utili della sua impresa in cambio della prestazione lavorativa.

CAPITOLO 23

Lo Statuto dei lavoratori è una legge che si occupa di tutelare **la libertà e la dignità del lavoratore**, della libertà e dell'attività sindacale.

I lavoratori, senza distinzione di opinioni politiche, sindacali e di fede religiosa, hanno diritto, nei luoghi ove prestano la loro opera, di manifestare liberamente il proprio pensiero (art. 1).

Nei luoghi di lavoro si può contestare al dipendente solo azioni o fatti che attengono alla tutela del patrimonio aziendale.

– Un datore di lavoro può sanzionare un dipendente soltanto se vengono rigorosamente rispettate le procedure definite nello Statuto, non sono possibili provvedimenti discrezionali.

– Gli **studenti lavoratori** hanno diritto a turni di lavoro che agevolino la frequenza dei corsi e la preparazione agli esami e non sono obbligati alle prestazioni di lavoro straordinario o durante i riposi settimanali. Durante le prove di esame hanno diritto a permessi retribuiti.

– Il lavoratore deve essere adibito alle **mansioni** per le quali è stato assunto.

– Le **attività sindacali** sono regolate dallo Statuto e i lavoratori hanno il diritto di riunirsi nell'unità produttiva in cui prestano la loro opera.

– Un datore di lavoro non può, se non con il consenso delle rappresentanze sindacali, trasferire uno o più dirigenti sindacali delle rappresentanze aziendali. Questa tutela opera fino all'anno successivo a quello in cui cessa l'incarico.

CAPITOLO 24

Lo sciopero è una forma di protesta che si esercita con l'astensione dalla prestazione lavorativa da parte del personale dipendente.

Il diritto di sciopero può essere esercitato nel modo più ampio possibile, però non deve ledere la vita o l'incolumità delle persone e non deve pregiudicare il diritto di impresa salvaguardando l'integrità degli impianti produttivi.

I lavoratori in sciopero non possono essere sostituiti da altri dipendenti, né da lavoratori con contratto a termine o part-time.

Nel pubblico impiego il diritto di sciopero nei servizi pubblici essenziali è parzialmente limitato. I lavoratori devono comunque garantire un livello minimo del servizio, per esempio, una fascia oraria in cui il servizio viene erogato, i servizi di pronto soccorso, la non astensione in periodi di grande mobilità (Natale, Ferragosto, Pasqua) ecc.
Il Governo e le prefetture possono emettere un decreto di precettazione, cioè l'ordine ai lavoratori di prestare servizio nonostante sia stato dichiarato lo sciopero.
La precettazione può essere richiesta soltanto quando sussista un fondato pericolo di un pregiudizio grave e imminente ai diritti della persona costituzionalmente tutelati.

CAPITOLO 25

L'impresa deve versare all'Inps i **contributi obbligatori** e di solidarietà a carico sia dell'azienda sia dei lavoratori con il fine di finanziare alcune gestioni come: il fondo pensioni dei lavoratori dipendenti; le prestazioni economiche assistenziali (malattia, disoccupazione maternità, mobilità, ecc.); il fondo di garanzia TFR (Trattamento di fine rapporto) e altre.
— L'Inail ha il compito di fornire un'**adeguata assistenza economica e sanitaria ai lavoratori che subiscono un infortunio**, che sono colpiti da malattie professionali o da danno biologico.
— Il datore di lavoro opera, per legge, come sostituto d'imposta. Egli all'atto del pagamento della retribuzione al lavoratore calcola e trattiene a titolo di acconto sul reddito delle persone fisiche la somma dovuta e la versa all'erario.
— La **risoluzione del rapporto di lavoro** può avvenire per dimissioni del lavoratore, per licenziamento, può essere consensuale fra le parti o può verificarsi per altre cause indipendenti dalla volontà delle parti.
Il lavoratore può cessare in qualsiasi momento il rapporto di lavoro, ma deve dare un certo periodo di preavviso la cui durata è stabilita dagli accordi contrattuali.
Il lavoratore subordinato ha diritto alla corresponsione del **Trattamento di fine rapporto** (TFR).

CAPITOLO 26

I lavoratori hanno diritto di operare in un ambiente rispettoso delle norme ma hanno anche il dovere: di partecipare alla formazione; di utilizzare i dispositivi di sicurezza previsti; di segnalare al datore di lavoro, attraverso il Rappresentante dei lavoratori per la sicurezza (RLS), le eventuali carenze del sistema o possibili miglioramenti apportabili a esso.
Il datore di lavoro ha il dovere di valutare i rischi per la salute e la **sicurezza dei lavoratori** e prevenirli utilizzando soggetti e strutture di supporto (medico competente, servizio di prevenzione e protezione) e adottando tutte le misure necessarie senza ritardi.
Il datore di lavoro è obbligato a valutare tutti i rischi, compresi quelli di stress legati all'attività svolta, e a elaborare uno specifico documento (Documento di valutazione dei rischi) che li elenchi dettagliatamente accompagnato dalle misure di prevenzione intraprese.
— Il RSPP è **la persona designata dal datore di lavoro in possesso di attitudini e capacità adeguate**. Egli è l'esperto aziendale alla sicurezza, di cui tutte le attività hanno l'obbligo di dotarsi.
— Il **medico competente** svolge funzioni di integrazione del sistema organizzativo complessivo della "sicurezza" dei luoghi di lavoro, essendo titolare di obblighi anche "operativi", e fondamentali nella gestione integrata del "sistema sicurezza", la legge affidandogli delicatissime funzioni di valutazione preventiva sull'idoneità dei lavoratori a specifiche mansioni, ciò che implica conoscenze dell'organizzazione concreta, delle mansioni stesse dei lavoratori, dell'intero assetto della struttura dell'impresa, nelle sue molteplici implicazioni produttive, organizzative, ambientali.
Il **rappresentante dei lavoratori per la sicurezza** (RLS) viene eletto nell'ambito della RSU (Rappresentativa Sindacale Unitaria), con il compito di rappresentarli in merito ai problemi di salute e sicurezza durante il lavoro.
Il datore di lavoro deve rendere disponibili e in quantità e qualità sufficienti tutti i **dispositivi di protezione individuali** (DPI) necessari per prevenire gli infortuni sul lavoro (indumenti speciali, guanti, caschi, cuffie ecc.).
Il **piano di emergenza dell'azienda**, previsto dal Testo unico sulla salute e la sicurezza nei luoghi di lavoro, deve fornire le procedure per affrontare l'emergenza fin dal primo insorgere per contenerne gli effetti sulle persone presenti nell'edificio; per pianificare le azioni necessarie per proteggere le persone sia da eventi interni sia da eventi esterni; per coordinare i servizi di emergenza, le squadre di evacuazione e di soccorso; per fornire una base informativa al personale normalmente presente in azienda e a chi temporaneamente è presente per vari motivi (clienti, fornitori, visitatori).
— Il processo di informazione è importantissimo e deve essere sviluppato oltre che con la pubblicazione in appositi albi del piano di emergenza anche con incontri di informazione/formazione che istruiscano mediante fogli informativi o con audiovisivi tutto il personale sul comportamento da tenere in presenza di emergenze.
— La squadra di emergenza per la **prevenzione degli incendi** è costituita da personale che ha seguito uno specifico corso di addestramento che li ha abilitati, mediante un attestato rilasciato dai Vigili del Fuoco, allo spegnimento e all'uso dei mezzi di estinzione.
La squadra di evacuazione è composta da un coordinatore delle emergenze e dai responsabili dell'area di raccolta, da un responsabile della chiamata di soccorso, e da vari responsabili dell'evacuazione dei locali dell'azienda, personale aprifila e serrafila.
Valutata la situazione e constatata la necessità di procedere all'evacuazione dell'edificio, attua la procedura prestabilita, si reca nel luogo stabilito nel piano di emergenza per essere il punto di riferimento per tutte le informazioni provenienti dai vari punti di raccolta e sovraintende a tutte le operazioni sia della squadra di

emergenza interna sia degli enti esterni di soccorso e quando cessa l'emergenza dà il segnale di fine emergenza.
La **segnaletica di sicurezza** assolve nel modo più semplice, immediato e sintetico al compito di informare i lavoratori sui rischi presenti e sui sistemi di prevenzione e protezione in atto.
— Le aziende devono ottemperare all'obbligo di **dotarsi di cassette di pronto soccorso**.
— I lavoratori devono essere addestrati a non perdere la calma e ad avvertire, se necessario, i presìdi esterni prestando le prime cure all'infortunato, nei limiti dell'addestramento ricevuto.
L'infortunato deve sempre farsi medicare, anche per infortuni di lieve entità, che possono sempre degenerare in gravi conseguenze (tetano, emorragie…) e devono sempre farsi registrare l'infortunio entro 24 ore dall'evento.
— Il **mobbing** si ha quando, sul posto di lavoro, si crea una situazione per la quale uno (o più lavoratori) subiscono in modo continuativo, con parole e comportamenti, atti di maltrattamento fisico o psicologico, finalizzati a danneggiare le vittime, costringendole talvolta anche a lasciare il lavoro.
— Per **trattamento dati** si intende qualunque operazione o complesso di operazioni effettuate con o senza l'ausilio di strumenti elettronici, che riguardano la raccolta, la registrazione, l'organizzazione, la conservazione, la consultazione, l'elaborazione, la modificazione, la selezione, l'estrazione, il raffronto, la cancellazione e la distruzione di dati sia registrati sia non registrati in una base dati.
— Il **Codice della privacy** prevede che il trattamento dei dati deve avvenire: nel rispetto dei diritti e delle libertà fondamentali; in regime di semplificazione, le procedure devono essere snellite e i diritti di accesso ai dati devono essere chiaramente definite; per necessità. I titolari del trattamento dati devono utilizzare soltanto i dati indispensabili, riducendo al minimo l'utilizzo di dati personali e identificativi, quando le finalità perseguite possono essere realizzate in altro modo, per esempio con dati anonimi o con modalità che non consentano di correlare i dati raccolti con l'interessato; con una finalità. Gli scopi di una raccolta dati devono essere ben definiti, espliciti e legittimi e non devono essere trattati in modo incoerente con le funzioni istituzionali del titolare; in modo lecito, cioè deve essere prevista da norme di legge o regolamentari; con proporzionalità, pertinenza e non eccedenza. I dati devono essere adeguati, pertinenti e non eccedenti rispetto alle finalità della raccolta e del trattamento. Il trattamento dei dati deve, pertanto, non essere eccessivamente intrusiva nella sfera personale dell'individuo.
— Il Codice della privacy prescrive l'adozione di una serie di "minime misure di sicurezza" di contenuto tecnico, informatico, organizzativo e logistico, che hanno lo scopo di tutelare i dati personali. Queste misure devono assicurare un livello sufficiente di protezione dei dati personali trattati; chiunque effettui un trattamento di dati personali deve effettuarlo in modo tale da rendere minimi i rischi di distruzione o di perdita degli stessi, da evitare accessi ai dati non autorizzati e da non porre in atto trattamenti non autorizzati o non conformi alle finalità di raccolta dei dati.

VERIFICHE

1.
Qual è la durata massima di un contratto a tempo determinato?

2.
Nel caso del contratto in somministrazione se l'agenzia non paga il lavoratore, l'azienda che lo ha impiegato è tenuta a erogargli lo stipendio?

3.
Quali tipi di apprendistato prevede la legge? Descrivili brevemente.

4.
Descrivi le caratteristiche del lavoro a chiamata (job and call).

5.
Si possono applicare le norme dell'art. 18 dello Statuto dei lavoratori a un socio lavoratore?

6.
Che tipo di contratto è quello dell'associazione in partecipazione?

7.
I controlli sullo stato di salute dei lavoratori devono essere sempre effettuati dai servizi ispettivi degli enti previdenziali o possono essere effettuati anche da medici di fiducia del datore di lavoro?

8.
Si può discriminare un lavoratore per la sua appartenenza o non a un'organizzazione sindacale?

9.
Il lavoratore durante il periodo di malattia è soggetto a reperibilità. Che cosa significa?

10.
Può il padre chiedere dopo la nascita del figlio chiedere il congedo parentale?

11.
Chi sceglie il medico competente? Quali sono le sue funzioni?

12.
Qual è la funzione del Rappresentante dei lavoratori per la sicurezza (RLS)?

13.
Quali norme di comportamento si seguono per prevenire un incendio?

14.
Quali sono i soggetti obbligati e interessati dal codice della privacy?

MODULO N

Economia aziendale e marketing

CAP 27 IL BILANCIO DI ESERCIZIO

CAP 28 MARKETING

RISORSE ONLINE CAP 29 LA QUALITÀ NELL'IMPRESA

Prerequisiti

- Nozioni di base di economia aziendale.
- Saper interpretare correttamente una norma italiana o europea.
- Concetti di qualità e innovazione di prodotto.

Obiettivi

Conoscenze

- Conoscenze di base sui criteri di determinazione dei prezzi dei prodotti e dell'influenza che i costi hanno nello studio e nella progettazione di un prodotto.
- Conoscere gli elementi principali di un bilancio di esercizio.
- Elementi di marketing.
- Concetti fondamentali sull'influenza della qualità nell'attività di un'impresa.

Competenze

- Saper estrarre dai dati di un bilancio aziendale informazioni circa lo stato economico e patrimoniale di un'azienda.
- Saper determinare il prezzo di un prodotto industriale.
- Saper valutare la convenienza economica a produrre un certo prodotto.
- Saper riconoscere e utilizzare gli strumenti del marketing.
- Adottare criteri di gestione e di progettazione in un contesto di qualità totale.

CAP 27 IL BILANCIO DI ESERCIZIO

1 Contabilità
2 La metodologia di rilevazione
3 Piano dei conti
4 Ciclo di bilancio
5 Contabilità analitica
6 Costi variabili e costi fissi
7 Determinazione del prezzo di vendita

Concetti chiave

- Bilancio di esercizio
- Conto economico
- Stato patrimoniale
- Nota integrativa
- Principi contabili internazionali IAS
- Partita doppia
- Libro giornale
- Libro mastro
- Ciclo di bilancio
- Costi variabili e fissi
- Costo primo
- Costo economico tecnico
- Margine di contribuzione

Il bilancio d'esercizio è un importante strumento di comunicazione aziendale. Esso fornisce a tutti i soggetti interessati all'andamento dell'impresa (*stakeholder*) informazioni sullo stato patrimoniale, finanziario ed economico dell'impresa. L'impresa è un'entità distinta dai proprietari o dei suoi azionisti.

I soggetti interessati al bilancio sono esterni all'impresa (finanziatori, enti di previdenza e assistenza, il fisco, lo Stato) e interni all'impresa (portatori di capitali di rischio, proprietari, azionisti (*shareholder*), management aziendale e dipendenti).

Lo scopo del bilancio è quello di fornire una periodica e attendibile conoscenza, secondo principi contabili corretti, del risultato economico conseguito nell'esercizio (**conto economico**) illustrante le componenti attive (ricavi) e passivi (costi) del reddito.

Deve essere effettuata una corretta valutazione e composizione della situazione patrimoniale (**stato patrimoniale**) dell'impresa e della sua situazione finanziaria, avendo cura di suddividere attività e passività in aggregazioni che tengano conto della loro esigibilità.

Deve essere data una corretta informazione sulle scelte operate nella stesura del bilancio (**nota integrativa**) affinché lo stesso possa svolgere la sua funzione di mezzo informativo patrimoniale, finanziario ed economico dell'impresa.

La redazione del bilancio deve essere formulata seguendo le prescrizioni previste dal Codice civile (artt. 2423 e seguenti).

Il bilancio di esercizio deve essere redatto basandosi sui principi che seguono.

— Principio della chiarezza.
— Rappresentazione veritiera e corretta.
— Informazioni complementari per attuare i due punti precedenti.
— Prevalenza degli aspetti sostanziali su quelli formali, quindi deroghe in casi eccezionali per rendere veritiero e corretto il bilancio.
— Competenza: l'effetto delle operazioni e degli altri eventi deve essere contabilizzato e attribuito nell'esercizio cui tali eventi si riferiscono e non quando si concretizzano i pagamenti e gli incassi.

— Neutralità, cioè imparzialità: il bilancio deve essere preparato per una moltitudine di destinatari e quindi si deve basare su principi contabili indipendenti senza servire interessi particolari.
— Principio della prudenza, cioè deve evidenziare solo gli utili realizzati.
— Comparabilità: fatti economici similari devono essere contabilizzati con gli stessi criteri.
— Omogeneità: deve essere usata la stessa moneta e nella nota integrativa deve essere evidenziato e motivato l'eventuale tasso di cambio adottato.
— Prospettiva: continuazione attività.
— Perdite di competenza: devono essere inserire anche se conosciute dopo la chiusura dell'esercizio.
— Il costo come criterio base delle valutazioni di bilancio dell'impresa in funzionamento.
— Conformità ai corretti principi contabili.

La Legge n. 306 del 31 gennaio 2003 prevede l'obbligo, per le società quotate in Borsa, dell'applicazione dei Principi Contabili Internazionali (IAS-International Accounting Standars) nella redazione dei bilanci.

L'art. 2423 del Codice civile prevede che il bilancio sia costituito da:
— stato patrimoniale, redatto secondo lo schema mostrato nell'art. 2424 c.c.;
— conto economico, redatto secondo lo schema mostrato nell'art. 2425 c.c.;
— nota integrativa, redatta tenendo conto delle informazioni richieste dall'art. 2427 c.c.

A questi documenti che costituiscono un insieme unitario si aggiungono la Relazione sulla gestione (art. 2428 c.c.) e la Relazione dei Sindaci (art. 2429 c.c.).

1 CONTABILITÀ

La **contabilità** rappresenta un sistema informativo (produce dei numeri) e si distingue in:
— contabilità **generale**, che tiene conto di ciò che entra, come viene trasformato e come esce, generando perdite, ricavi ecc.;
— contabilità **analitica**, che gestisce un solo prodotto rispetto a un altro concorrente e fa comprendere quali e dove sono i punti di forza e di debolezza dell'azienda.

Contabilità generale

Il conto economico valuta tutti i costi che l'azienda ha sopportato: le materie prime più i costi di trasformazione e di gestione (input) per produrre le merci o i servizi che pone in vendita (output).

Se il valore dell'output è maggiore dei costi sostenuti si genera un guadagno, in caso contrario una perdita.

Lo stato patrimoniale valuta la situazione patrimoniale di una società in un dato momento, in genere, la data di chiusura dell'anno di esercizio. Il documento è redatto a sezioni contrapposte: a sinistra vi sono le

Attività a destra le **Passività**. Le voci dello schema patrimoniale sono definite dall'art. 2424 c.c. per le società per azioni e dall'art. 2217 c.c. per la generalità delle imprese.

Nell'attività sono elencate: le liquidità immediate (cassa); le liquidità differite (crediti verso clienti, cambiali commerciali, prestiti di prima riscossione, titoli, anticipi ai fornitori); le rimanenze (prodotti finiti da vendere, materie prime, semilavorati); le attività immobilizzate, materiali e immateriali (magazzini, macchine, terreni, fabbricati, marchi e brevetti, licenze, concessioni) di natura tecnica o finanziaria (crediti di finanziamento a medio e lungo termine, partecipazioni di controllo in altre imprese ecc.).

Nelle passività sono elencate: i debiti dell'impresa verso terzi che la stessa ha contratto per finanziare le attività. Le passività possono essere a breve termine (prestiti con scadenza inferiore all'anno, debiti verso banche e fornitori, imposte, cambiali passive commerciali ecc.) e a medio-lungo termine (i debiti finanziano gli investimenti in immobilizzazioni, che implicano il rimborso e il pagamento di interessi, che hanno durata superiore all'anno come i prestiti obbligazionari, i mutui passivi, il TFR ecc.).

La differenza fra attività e passività dà il **Capitale netto** che rappresenta la misura di quanto rimane dopo che sono stati soddisfatti tutti i creditori, cioè il valore dell'azienda. Nel capitale netto confluiscono: il capitale versato dai soci, o dal proprietario, e le riserve costituite negli anni precedenti dagli utili conseguiti e non distribuiti sotto forma di dividenti ai soci. Il capitale netto aumenta se l'azienda consegue utili e diminuisce in caso di perdite.

Stato Patrimoniale all'inizio dell'attività (in euro)

ATTIVITÀ		PASSIVITÀ	
Cassa	500		
Impianti	3500		
		Capitale versato dai soci	4000

Il capitale versato dagli azionisti (4000) è una passività perché è come se l'azienda, un soggetto terzo, avesse un debito nei confronti di chi ha versato dei soldi per iniziare l'attività. Non esiste ancora un conto economico in quanto l'attività non è ancora cominciata.

L'azienda inizia la sua attività e durante l'esercizio (anno dal 1° gennaio al 31 dicembre) compie le seguenti operazioni:

a) Acquisto materiali 3000
b) Retribuisce i lavoratori 1000
c) Costi amministrativi 1500
d) Manutenzione impianti 300
e) Provvigioni vendite 700
f) Ricavi di vendite 6200
g) Interessi attivi 100
h) Proventi su titoli 600

Calcoliamo ora il conto economico.

Conto Economico 2010

COSTI	RICAVI
a = 3000 b = 1000 c = 1500 d = 300 e = 700	f = 6200 g = 100 h = 600
Totale 6500 Utile 400	Totale 6900
Totale a pareggio 6900 Costi che l'azienda deve sostenere	Beni che l'azienda deve ottenere

Dalla tabella si evince che i ricavi superano i costi, pertanto l'azienda ha avuto un utile. Quindi se la differenza ricavi costi viene iscritta nella colonna:
— sezione Dare del conto economico si ha un UTILE;
— sezione Avere del conto economico si ha una PERDITA.

L'azienda nell'anno di esercizio ha variato anche il livello di stato patrimoniale.

Analizziamo ora le attività e le passività.

a) Variazioni di liquidità (da 500 a 200), ne ho spesi 300
b) Mutuo (2000)
c) Debiti verso (v/s) fornitori (3500)
d) Debiti verso (v/s) dipendenti (100)
e) Acquisto di titoli (250)
f) Crediti da clienti (3050)
g) Magazzino (2900)
h) Brevetti (100)
i) Impianti (3500)

Stato Patrimoniale (31-12-2010)

ATTIVITÀ		PASSIVITÀ	
Cassa (a)	200	Mutuo (b)	2000
Acquisto titoli (e)	250	Debiti v/s fornitori (c)	3500
Credito da clienti (f)	3050	Debiti v/s) dipendenti (d)	100
Magazzino (g)	2900		
Brevetti (h)	100		
Impianti (i)	3500		
Totale a pareggio	10000		5600
		Patrimonio netto	4400
		Totale a pareggio	10000

I 4400 del patrimonio netto sono composti dai 4000 del patrimonio iniziale più i 400 dell'utile ottenuto dal conto economico.

2 LA METODOLOGIA DI RILEVAZIONE

Per rilevare correttamente le operazioni aziendali è necessario seguire alcuni principi e alcune regole che sono legati al metodo della **partita doppia**.

Con questo metodo si verifica la costante uguaglianza fra addebitamenti e accreditamenti nei diversi conti utilizzati.

Ogni operazione può essere osservata da un duplice aspetto:

— l'aspetto finanziario che misura in termini monetari l'ammontare dell'operazioni;

— l'aspetto economico che rappresenta l'aspetto derivato, in quanto il costo, il ricavo o la variazione del patrimonio netto avviene misurando la variazione finanziaria.

Nella ***figura 27.1*** sono evidenziati i rapporti dell'azienda con i suoi clienti e fornitori.

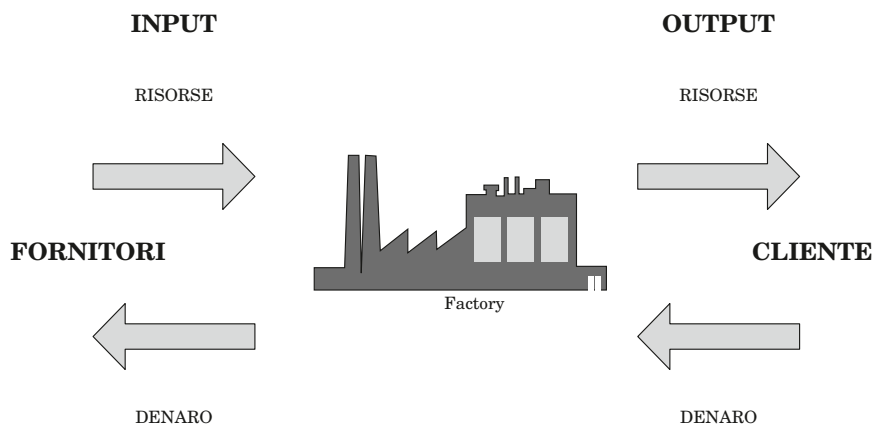


Fig. 27.1
Schema che illustra i rapporti dell'azienda con i suoi clienti e fornitori.

Il fornitore fornisce all'azienda della merce e l'azienda paga con soldi o con debiti. L'azienda dà al cliente la merce e riceve soldi o crediti.

Le risorse che l'azienda riceve dal fornitore genera una variazione non numeraria.

Il denaro che versa al fornitore rappresenta una variazione numeraria.

La somma del valore finale delle entrate deve essere uguale alla somma della moneta che esce.

Lo stesso avviene con i clienti dell'azienda: l'azienda cede valori non numerari (economici) e riceve valori numerari (finanziari).

I conti vengono movimentati secondo queste regole.

Conto finanziario

— Le variazioni finanziari attive (VFA) si iscrivono in Dare
aumento di cassa e cc/banche, aumento di crediti, diminuzione di debiti.

— Le variazioni finanziari passive (VFP) si iscrivono in Avere
diminuzione di cassa e cc/banche, diminuzione di crediti, aumento di debiti.

Conto Finanziario	
VFA **DARE**	**VFP** **AVERE**
↑ cassa e banche	↓ cassa e banche
↑ crediti	↓ crediti
↓ debiti	↑ debiti

Conto economico

— Le variazioni economiche negative (VEN) si iscrivono in Dare aumento di costi o riduzione di ricavi, diminuzione del Patrimonio netto.
— Le variazioni economiche positive (VEP) si iscrivono in Avere diminuzione di costi o aumento di ricavi, aumento del Patrimonio netto.

Conto Economico	
VEN **DARE**	**VEP** **AVERE**
↑ costi	↑ costi
↓ ricavi	↓ ricavi
↓ Patrimonio netto	↑ Patrimonio netto

Si noti che le due serie di conti funzionano in modo antitetico, in quanto:
— nei conti finanziari le variazioni attive sono in Dare, mentre nei conti economici sono in Avere;
— nei conti finanziari le variazioni passive sono in Avere mentre nei conti economici sono in Dare.

Si deve verificare che il totale degli accreditamenti deve essere uguale agli addebitamenti.

Quindi l'azienda deve essere vista come una parte di un sistema integrato, in quanto ciò che è l'output di un'azienda è l'input di un'altra azienda. Il ciclo economico non si chiude nell'azienda.

I simboli grafici che abbiamo utilizzato si chiamano MASTRI e per ogni operazione si fa un MASTRO.

Le fasi di acquisto di materiali dai fornitori prevedono queste operazioni.

1. L'apertura di una trattativa.
2. In seguito all'accordo si stipula una convenzione o un contratto.
3. Si dà esecuzione al contratto consegnando la merce.
4. Accettata la consegna viene emessa la fattura. In questa fase nasce il debito dell'azienda e il credito del fornitore. Nella fattura viene riportato: l'elenco dei materiali acquistati, la percentuale di Iva, i dati del fornitore e quelli del cliente. Il pagamento, cioè la riscossione del corrispettivo, può avvenire alla consegna del materiale, alla consegna della fattura o successivamente a circa 90-120 giorni.
5. Con il pagamento si ha l'estinzione del debito dell'azienda e del credito del fornitore.

6. Il rapporto continua fino alla scadenza dei termini di garanzia. La fornitura potrebbe presentare difetti e potrebbe essere restituita o sostituita.

A livello contabile i momenti fondamentali sono due: la fatturazione e il pagamento.

Al momento della fatturazione il fornitore (chi vende) rileva un credito e, quindi, iscrive un ricavo nel conto economico; chi compra invece sostiene un costo dal momento in cui gli arriva la fattura.

Chi ha fornito il bene ha ceduto qualcosa, però ha creato un credito (quantità numeraria). Dall'altra parte c'è un cliente che ha un debito verso il fornitore, però ha un introito di situazioni produttive (merce consegnata con la fattura).

Il momento del pagamento è il momento in cui il debito si converte in moneta, si estingue il debito e si ha un'uscita di cassa; il fornitore non ha più il credito, però ha più denaro in cassa.

FATTURAZIONE	Momento di credito del fornitore
	Momento di debito da parte del cliente e un'entrata di materiali

PAGAMENTO	Annullamento del credito con aumento di cassa
	Annullamento del debito con diminuzione di cassa

La scrittura delle operazione sui mastri viene effettuata nel modo che segue.

MERCI C/ACQUISTI (conto acquisti) = mastro numerario

DARE	AVERE
Farine 10000	
↑	↑
Input	Output

DEBITI V/S FORNITORE = mastro non numerario

DARE	AVERE
	Farine 10000

Dal punto di vista dell'azienda che acquista:

LIBRO GIORNALE

1. Acquisto Farine	a	Debiti v/s fornitori	10000 input
2. Crediti di clienti	a	Merci c/vendite	10000 output

Nella parte sinistra si mettono tutte le condizioni fisico-tecniche che permettono di produrre (tutti i beni che entrano). Nella parte destra si mettono tutti i beni che escono dall'azienda.

Se il cliente paga quando il fornitore consegna la fattura i due momenti sono contestuali, quindi il cliente non rileva un debito ma una variazione di cassa, come mostrano le registrazioni che riportiamo.

Registrazione del momento in cui viene effettuato il pagamento dal **cliente**:

MERCI C/ACQUISTI		DEBITI		CASSA	
Pellame 10		Pellame da Marco 10 =	Pellame da Marco 10 = (chiusura)		10

↑ Debiti v/s fornitori ↑

Stessa registrazione dal punto di vista del **fornitore**:

MERCI C/VENDITE		DEBITI		CASSA	
	Pellame 10	Pellame 10 =	Pellame Daniele 10 = (chiusura)	10	

Cassa a crediti v/s Daniele ↑

3 PIANO DEI CONTI

Il piano dei conti è l'insieme di tutti i conti che l'azienda ha deciso di aprire; quindi in questo caso sono:

1. Cassa
2. Merci c/acquisti
3. Vendite panini
4. Condizioni produzione del patrimonio (coltello)
5. Debiti v/s finanziamenti

La contabilità generale fornisce informazioni generali sull'azienda, tali informazioni sono rivolte all'esterno dell'azienda e interessano ai creditori, ai fornitori, al fisco, ai finanziatori. Ma un'ulteriore elaborazione dei conti, che presti attenzione a un prodotto o a una linea di prodotti, permette di fornire informazioni utili all'azienda per elaborare le sue strategie di produzione e di vendita. Questa operazione viene compiuta utilizzando gli strumenti forniti dalla contabilità analitica che entra più nel merito delle decisioni aziendali.

4 CICLO DI BILANCIO

Durante un esercizio vengono effettuate le seguenti rilevazioni.

1. Apertura dei conti o costituzione dell'azienda.
2. Rilevazione degli accadimenti aziendali: parte numeraria e non numeraria.
3. Inserimento di valori stimati o congetturati.

— Un valore stimato si può confrontare con quello effettivo e si può controllarne la validità.
— Un valore congetturato non può essere confrontabile.

4. Quadratura contabile: la somma delle poste Dare deve essere uguale alla somma delle poste Avere.
5. Rilevazione di fine esercizio e chiusura del bilancio con la redazione del Conto Economico e dello Stato Patrimoniale.

L'anno successivo si riaprono i conti riportando le poste non chiuse (ratei e risconti) e il ciclo ricomincia.

Le operazioni vengono registrate nel Libro Mastro e nel Libro Giornale.

Libro giornale

Il Libro giornale assume la seguente forma tabellare:

CODICI		DATA		IMPORTI
N. Progr.	Conti da Addebitare	a	Conti da Accreditare	

Si supponga che a Libro giornale siano state annotate le seguenti operazioni contabili:

LIBRO GIORNALE

1. Fondi liquidi	a	Capitale proprio	5000	5000
2. Diversi	a	Fondi liquidi		5000
Macchinari	a		2000	
Impianti	a		800	
Fabbricati	a		1700	
Attrezzature	a		500	
3. Fondi liquidi	a	Prestito bancario	1000	1000
4. Acquisto pellami	a	Diversi	800	
		Fondi liquidi		400
		Debiti v/s fornitori		400
5. Fondi liquidi	a	Ricavi in c/vendita	120	120
6. Lavoro (costo)	a	Fondi liquidi	80	80
7. Credito v/s clienti	a	Ricavi in c/vendita	250	250
8. Energia elettrica	a	Fondi liquidi	50	50
9. Crediti v/s clienti		Ricavi in c/vendita	1030	1030

LIBRO MASTRO

Fondi liquidi (p)

DARE		AVERE	
(1)	5000	(3)	5000
(2)	1000	(4)	400
(5)	120	(6)	80
		(8)	50
	6120		590
			chiusura

Capitale proprio (p)

DARE		AVERE	
	5000	(1)	5000
	=	=	

Impianti (p)

DARE		AVERE	
(2)	800		
	=	=	

Macchinari (p)	
DARE	AVERE
(2) 2000	
=	=

Fabbricati (p)	
DARE	AVERE
(2) 1700	1700
=	=

Attrezzature (p)	
DARE	AVERE
(2) 500	500
=	=

Prestito bancario (p)	
DARE	AVERE
(3) 1000	1000
=	=

Pellami (R)	
DARE	AVERE
(4) 800	800
=	=

Debito vs. fornitori (p)	
DARE	AVERE
(4) 400	400
=	=

Ricavi c/vendite (R)	
DARE	AVERE
	(5) 120
	(7) 250
	(9) 1030
1400	
=	=

Lavoro (R)	
DARE	AVERE
(6) 80	80
=	=

Credito vs. clienti (p)	
DARE	AVERE
(7) 250	(9) 1030
=	=

Il Libro giornale ha registrato le operazioni effettuate da un imprenditore, il sig. Trebeschi, che ha avviato un'attività di produzione artigianale di borse in pelle.

L'investimento iniziale del sig. Trebeschi è di 5000 (l'azienda ha, quindi, una liquidità di 5000, ma ha un debito di 5000 nei confronti del sig. Trebeschi), l'azienda ha acquistato: macchinari per 6000, impianti per 800, fabbricati per 1700, attrezzature per 500 e si è indebitata per 1000 presso un fondo bancario.

Inoltre, acquista il materiale di base per la produzione (pellame) pagando immediatamente metà del costo e impegnandosi a pagare la parte restante dopo 90 gg.

Il sig. Trebeschi con il lavoro della sua famiglia produce le borse, le vende realizzando un ricavo di 120 (fondi liquidi) e a fine mese paga lo stipendio ai suoi dipendenti spendendo 80.

Il sig. Trebeschi effettua, inoltre, una vendita per 250 con condizioni di pagamento a 60 gg e paga la bolletta Enel per 50.

Vende a negozi per 1030. Il pellame è stato utilizzato solo per 700.

Rimane una giacenza di pellame pari a 100; dal punto di vista contabile è come se questa merce venga venduta all'esercizio dell'anno successivo.

Quindi le rimanenze finali di merce in magazzino è come se le si vendessero l'anno successivo, quindi il magazzino è un costo.

Energia elettrica (R)

DARE		AVERE	
(8)	50		

Sulla base delle indicazioni precedenti effettuiamo le scritture di fine esercizio (31 dicembre) a Libro giornale.

LIBRO GIORNALE

10. Magazzino (R)	a	Rimanenze di esercizio	100	100
11. Quote ammortamento	a	Fondo ammortamento (P)	287	287
			13717	13717

LIBRO MASTRO

Magazzino (p)

DARE		AVERE	
(10)	100		100

Rimanenza (R)

DARE		AVERE	
		(10)	100
			100

Quota ammortamento

DARE		AVERE	
(11)	287		
			287

Fondo ammortamento

DARE		AVERE	
		(11)	287

La rimanenza è un ricavo d'esercizio che deve subire un processo di ammortamento che consiste nel detrarre anno per anno una quota (quote di ammortamento) del valore del bene. La durata dell'ammortamento è di 10 anni, ma per certi tipi di beni a rapida obsolescenza tecnologica può essere ridotto.

Anno dopo anno man mano che il processo di ammortamento progredisce il valore di macchinari, impianti, fabbricati attrezzature, diminuisce riducendo l'attivo patrimoniale.

Stato Patrimoniale

ATTIVITÀ	PASSIVITÀ
5000 –287 4713	287+287 2° anno

Conto Economico

COSTI	RICAVI
287	

Alla fine dei 30 anni i 5000 sono completamente immobilizzati.

Conto Economico

Pellami	800	Ricavi	1400
Lavoro	80	Rimanenze esercizio	100
Enel	50		
Quota ammortamento	287		
	1217		1500
Utile	283		

Stato Patrimoniale

ATTIVITÀ		PASSIVITÀ	
Impianti	800	Prestito bancario	1000
Fabbricati	1700	Debiti vs. fornitori	400
Attrezzature	500	Fondo ammortamento	287
Crediti vs. clienti	1280		
Liquidità	590		
Magazzino	100		
Totale a pareggio	6970	Capitale proprio	5000
		Utile	283
			6970

Scritture conclusive sul Libro giornale a chiusura dei conti

L'anno successivo si riaprono i conti riportando le poste non chiuse (ratei e risconti) e il ciclo ricomincia.

Le operazioni vengono registrate nel Libro mastro e nel Libro giornale effettuando le seguenti scritture così che il nuovo esercizio parta con i conti già aperti.

LIBRO GIORNALE

Conto economico	a	Diversi	pellami	1217	800
			lavoro		80
			Enel		50
			Quota di ammortamento		287
Diversi	a	Conto economico (si trascrive solo nella colonna avere del conto Rimanenze di esercizio)			
Stato patrimoniale	a	Diversi (si trascrive nella colonna dare)			
Diversi	a	Stato patrimoniale (si trascrive solo nella colonna avere P)			

5 CONTABILITÀ ANALITICA

Le aziende necessitano di un sistema contabile di controllo direzionale strutturato sulla base di confronti mensili fra dati previsionali di budget e dati consultivi effettivi rilevati dalla contabilità dell'azienda.

Lo strumento utilizzato per ottenere questo scopo è la contabilità analitica.

Può essere utilizzato un sistema informatico per estrarre informazioni aggregando e disaggregando voci/posta della contabilità generale per ottenere specifici fini o scopi conoscitivi. Un'analisi dei dati serve a capire l'andamento economico di parti singole dell'azienda rappresentate da prodotti/servizi/progetti/divisioni ecc. È importante comprendere la metodologia attraverso la quale si aggregano e disgregano le informazioni in modo da capirne poi i messaggi che si trasmettono agli organi decisori.

Si deve individuare una struttura di contabilità analitica che si adatta al tipo di informazioni/conoscenze che si vogliono raggiungere. È quindi un'analisi specifica per cui le soluzioni variano da azienda ad azienda.

Lo strumento più importante di cui si avvale la direzione è il piano dei centri di responsabilità. Il centro di responsabilità personalizza i costi, cioè individua la persona dell'azienda che ne ha la responsabilità e che deve contenerli nei limiti prefissati.

Le operazioni da effettuare per implementare un valido sistema di contabilità analitica prevedono quanto segue.

1. **Strutturazione del sistema di rilevazione analitico** per le specifiche finalità informative:
   - — definire la struttura di questo sistema;
   - — definire la tipologia di costo o di provento che si vuole analizzare;
   - — definire la tipologia di prodotto o servizio che si vuole contabilizzare.
2. **Individuazione dei responsabili.** È necessario decidere per ogni prodotto e/o progetto a chi attribuire la responsabilità, per conferirgli delle risorse (utilizzando lo strumento del budget), delle mete da raggiungere e quindi della responsabilità. Una volta individuato il responsabile, si decidono gli obiettivi da conseguire e i termini temporali in cui vanno ottenuti, se alla scadenza non sono stati raggiunti è possibile analizzare gli errori fatti, e se questi sono gravi il responsabile se ne assume le conseguenze.
3. **Budgeting.** È la fase di negoziazione tra il direttore generale e il direttore dei prodotti; in questa fase si cerca il necessario compromesso fra obiettivi e risorse.
4. **Accadimenti aziendali.** Vengono acquisite tutte le rilevazioni contabili sia in contabilità generale sia in contabilità analitica.
6. **Business reporting.** Viene redatto lo stato patrimoniale e il conto economico per ogni singola divisione aziendale; in questo modo si può analizzare la redditività di un prodotto o di un servizio. Stabilite perdite e guadagni, e l'incidenza che questi hanno sul fatturato e sul sistema dei costi, l'azienda ha un importante strumento per definire le proprie strategie aziendali.
7. **Reporting.** È l'operazione di analisi dei risultati raggiunti con la quale, se i risultati sperati o gli obiettivi che ci si era dati, non sono stati raggiunti si tenta di individuarne le cause, quali, per esempio,

acquisti sbagliati, volumi di vendita bassi, materiali resi perché non di qualità soddisfacente. In tal modo è possibile capire: se è conveniente produrre un certo bene o servizio; il motivo dei risultati diversi rispetto alle aspettative; quali errori sono stati compiuti; come modificare gli obiettivi e mutare strategia.

Nelle decisioni relative a possibili alternative di azione si possono distinguere:

— costi eliminabili, sono costi nati da una scelta da parte del decisore in base a varie alternative possibili; si cerca di determinarne la rilevanza e di valutare se, optando per scelte diverse, possano essere diminuiti o annullati;
— costi ineliminabili, sono costi che, qualsiasi opzione venga scelta, devono essere sostenuti;
— costi differenziali, si sceglie un'alternativa di costo e la si utilizza come riferimento per valutare le altre opzioni possibili;
— costi opportunità (o figurativi), ovvero la perdita è relativa al mancato guadagno che si sarebbe potuto ottenere utilizzando i fattori produttivi per realizzare un'altra merce o un altro servizio;
— costi preventivi, sono costi stimati su base probabilistica per quantificare le conseguenze di una certa azione intrapresa dall'azienda.

6 COSTI VARIABILI E COSTI FISSI

I costi aziendali possono essere classificati, in **funzione della loro natura**, in costi variabili e costi fissi.
I **costi variabili** variano in relazione alle quantità di merci, o del volume di servizi, prodotti dall'azienda. Possono essere: proporzionali (aumentano o diminuiscono proporzionalmente al volume della produzione); progressivi (aumentano più che proporzionalmente all'aumentare della produzione); regressivi (aumentano in maniera inversamente proporzionale rispetto al volume della produzione), per esempio, quando si utilizza una capacità produttiva dell'azienda prima inutilizzata.

I **costi fissi** non variano in relazione alle quantità prodotte, e restano fissi finché non si arriva alla saturazione dell'impianto.

Alcuni costi sono di tipo **semivariabile**, hanno cioè una componente fissa e una componente variabile che varia in funzione delle quantità prodotte (per l'energia elettrica si paga una quota fissa contrattuale più una parte variabile legata al consumo ecc.).

I costi aziendali possono essere classificati, in **funzione della loro destinazione**, in costi diretti e costi indiretti.

I **costi diretti** sono tutti i costi che possono essere attribuiti in modo specifico a un singolo prodotto e che si possono misurare in modo oggettivo (quantità di materie prime, retribuzione della manodopera ecc.).

I **costi indiretti** sono quei costi che si sostengono per realizzare il processo produttivo ma che non è possibile attribuire in modo oggettivo a un singolo prodotto (costo di illuminazione o di affitto di uno stabilimento, energia elettrica consumata negli uffici, stipendio del direttore generale, costi dei finanziamenti, costi di ammortamento degli impianti, delle attrezzature e dei fabbricati che sono connessi alla produzione di più pro-

dotti, manutenzione ordinaria e straordinaria, manodopera indiretta per operazioni di segreteria e di amministrazione ecc.).

I costi fissi di tipo comune sono costi indiretti che l'azienda sostiene, ma che non sono direttamente imputabili a nessun prodotto.

Il costo di un prodotto o di un servizio è un insieme di costi diretti e indiretti.

La ***tabella 27.1*** evidenzia che talvolta non produrre è peggio che produrre in perdita, in quanto i costi fissi incidono comunque, mentre producendo vengono coperti i costi variabili e una parte dei costi fissi. Non si guadagna, anzi si perde, ma si perde di meno.

Tabella 27.1 Classificazione dei costi

NATURA DEI COSTI	COSTI	DESTINAZIONE DEI COSTI	
		DIRETTA	INDIRETTA
	FISSO	Costi fissi di tipo specifico	Costi fissi di tipo comune
	VARIABILE	Costi mano d'opera Costi materie prime	

Per meglio comprendere come i costi possano influenzare le scelte aziendali circa i beni da produrre si propone il seguente esempio numerico.

Un'azienda produce tre tipi di prodotti A, B e C conseguendo i risultati economici evidenziati nello schema che segue.

	PRODOTTO A	PRODOTTO B	PRODOTTO C	TOTALI
+ Ricavi	25	15	10	50
– Costi fissi comuni	8	3	4	15
1° Margine di controllo	17	12	6	
– Costi fissi specifici	4	6	3	
2° Margine di controllo	13	6	3	
– Costi variabili	6	3	6	
Utile/perdite	7	3	–3	utile 7

Se, tentati dai risultati, l'azienda decide di non produrre più il prodotto C in quanto la sua produzione avviene in perdita (–3), eliminiamo i costi variabili (6) ma non i costi fissi comuni (4) e i costi fissi di prodotto (3) che devono essere aggiunti ai costi di produzione dei prodotti A e B così l'utile si annulla. È chiaro che conviene comunque produrre il prodotto C che genera una perdita ma aiuta a pagare i costi fissi aziendali.

Dallo schema si evince anche una semplice regola: se i primi due margini di controllo (MdC) dei prodotti sono positivi si deve continuare a produrre, altrimenti la situazione dell'azienda peggiora.

7 DETERMINAZIONE DEL PREZZO DI VENDITA

Un'impresa per poter definire una corretta politica dei prezzi che le permetta sia di ottenere un'economicità della gestione sia di operare in modo competitivo su un qualsiasi mercato deve effettuare uno studio approfondito dei costi.

La conoscenza della natura e dell'entità dei costi permette all'imprenditore, o alla direzione generale, di prendere le decisioni necessarie per salvaguardare l'operatività economica dell'impresa.

Nell'esempio del paragrafo precedente si è analizzata, dati i costi e i prezzi di vendita, la convenienza o meno a produrre. Nel prossimo paragrafo analizziamo alcuni metodi per determinare il prezzo di vendita di un prodotto.

Il costo del prodotto

La capacità di calcolare esattamente il costo del prodotto e di eliminare gli sprechi è alla base del successo aziendale.

Il primo costo da calcolare è il costo diretto di natura industriale. Bisogna valutare attentamente il processo di trasformazione quantificando le materie prime impiegate e il costo della manodopera. Questo costo è detto **costo primo**. A questo si devono aggiungere i **costi indiretti** di produzione, che per loro natura non sono imputabili direttamente al prodotto, quali i costi del personale direttivo; il costo degli impianti e macchinari; i canoni di locazione dello stabilimento ecc.

Alla somma dei costi diretti e indiretti industriali si devono ora aggiungere i **costi di natura non industriale**, cioè quelli non legati al processo di trasformazione, quali i costi di amministrazione, commerciali, finanziari; le imposte; le tasse ecc. Si ottiene così il **costo complessivo** (o **costo pieno**).

A questo punto per poter fissare il prezzo di vendita viene aggiunto un **costo economico tecnico figurativo** che tiene conto della convenienza a investire il capitale nell'attività economica invece che in altre forme senza essere sottoposti al rischio di impresa. Si ottiene con il **costo economico tecnico**.

La parte complessa del calcolo dei costi riguarda la suddivisione dei costi indiretti. Si possono utilizzare due criteri di ripartizione: **su base aziendale** o **su base multipla aziendale**.

Si possono utilizzare quantità fisiche (quantità di materie prime impiegate, ore di lavoro della manodopera, ore di lavoro delle macchine, numero di prodotti realizzati ecc.) o quantità monetarie (costo delle materie prime, costo primo, ricavi di vendita ecc.).

La ***figura 27.2*** mostra un esempio di applicazione dei due criteri di applicazione di riparto delle spese indirette.

Il metodo di riparto su base multipla è di più complessa applicazione, ma più esplicativo rispetto a quello su base aziendale e offre maggiori informazioni.

Un metodo alternativo di valutazione dei costi, detto **ABC** (Activity Based Costing), si basa sulla considerazione che essi devono essere calcolati sulle attività che li generano. Per esempio, ordinare le materie prime, controllarne la qualità, immagazzinarle, gestire un eventuale contenzioso.

Un'impresa ha costi di:
– riscaldamento: € 1000
– manutenzione macchine: € 500
e produce, impiegando 50 ore di manodopera, due prodotti X e Y. Il prodotto X viene realizzato in 20 ore e il prodotto Y in 30 ore.

BASE DI CALCOLO UNICA AZIENDALE		BASE DI CALCOLO MULTIPLA AZIENDALE	
Coefficiente di riparto = Totale costi indiretti / Totale ore di manodopera = 1500/50 = 30		Coefficiente di riparto (1) = Totale costi riscaldamento / Totale ore di manodopera = 1000/50 = 20 Coefficiente di riparto (2) = Totale costi manutenzione macchine / Totale ore di manodopera = 500/50 = 10	
Costi indiretti prodotto A = coefficiente di riparto × ore di manodopera richieste = 30 × 20 = € 600	Costi indiretti prodotto B = coefficiente di riparto × ore di manodopera richieste = 30 × 30 = € 900	**Riscaldamento** Costi indiretti prodotto A = coefficiente di riparto (1) × ore di manodopera richieste = 20 x 20 = € 400 **Manutenzione macchine** Costi indiretti prodotto A = coefficiente di riparto (2) × ore di manodopera richieste = 10 x 20 = € 200	**Riscaldamento** Costi indiretti prodotto B = coefficiente di riparto (1) × ore di manodopera richieste = 20 x 30 = € 600 **Manutenzione macchine** Costi indiretti prodotto B = coefficiente di riparto (2) × ore di manodopera richieste = 10 x 30 = € 300

Figura 27.2
Criteri di applicazione di riparto delle spese indirette.

Quindi se sono le attività a generare i costi, più attività si devono compiere, più costoso risulterà il prodotto. Questa metodologia permette di individuare costi diversi per prodotti sostanzialmente analoghi. Per esempio, un prodotto che impiega due tipi diversi di materiali (borse in pelle e in nappa) per la sua realizzazione richiede o un nuovo macchinario o, se si impiega lo stesso macchinario, un riattrezzaggio dello stesso. Questo maggior costo può essere attribuito solo al secondo prodotto perché è la sua produzione che lo genera.

La convenienza economica

L'analisi dei costi consente all'azienda di valutare la convenienza economica a produrre un certo prodotto, cioè si vuole sapere quanti prodotti dovranno essere realizzati e venduti perché l'impresa non subisca una perdita.

Questa analisi porta alla determinazione del cosiddetto **punto di pareggio** (BEP-Break Even Point) che individua la quantità di prodotto venduto in corrispondenza del quale i costi uguagliano i ricavi. L'analisi può essere condotta per via algebrica o grafica.

BEP
– Break Even Point (Punto di pareggio)

Il punto di pareggio viene raggiunto quando la quantità di prodotto (Q) moltiplicata per i costi variabili (cv) sommati ai costi fissi (CF) uguaglia la Quantità prodotta (Q) per il prezzo unitario di vendita (P), cioè i costi totali uguagliano i ricavi totali.

$$Q \times cv + CF = Q \times P$$

Risolvendo l'equazione si ottiene che:

$$Q = \frac{CF}{P - cv}$$

La quantità Q rappresenta quindi la quantità di prodotto che deve essere realizzato perché si raggiunga il punto di pareggio. Per quantità inferiori l'impresa lavora in perdita, per quantità superiori l'impresa consegue un profitto.

Il metodo di valutazione di convenienza economica basato sul punto di pareggio non può essere utile se non è possibile distinguere nettamente i costi fissi da quelli variabili; inoltre l'andamento delle funzioni di costo nella realtà non sono lineari come mostrato nel grafico della ***figura 27.3***. L'andamento delle funzioni di costo può essere modificato dal fatto che vi sono notevoli scorte di merci invendute e quindi si è costretti a rallentare la produzione modificando così la curva dei costi variabili o a incrementarli per sostenere le vendite.

È possibile determinare il punto di pareggio utilizzando diagrammi di redditività come quello mostrato nella figura 27.3.

Sull'asse delle ascisse si pone la quantità di prodotto fabbricato e venduto, e sull'asse delle ordinate i valori di costo e di ricavo.

I costi fissi sono rappresentati da una retta parallela all'asse delle ascisse (sono costanti fino al raggiungimento della massima capacità produttiva) e i costi variabili, in prima approssimazione, sono rappresentati da una retta partente dall'origine con inclinazione pari ai costi variabili totali. I ricavi sono rappresentati da una retta passante per l'origine con inclinazione che varia in funzione del prezzo di vendita.

Riunendo le tre curve in un unico diagramma si ricerca il punto di intersezione fra la curva dei costi totali e quella dei ricavi totali. L'ascissa di questo punto rappresenta la quantità di prodotto che determina il punto di pareggio. Per valori di produzioni inferiori al punto di pareggio l'impresa è in perdita, mentre per valori superiori ha un utile.

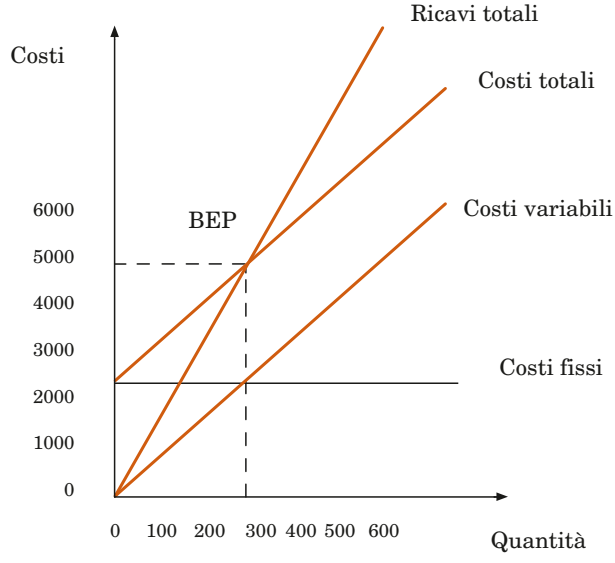


Fig. 27.3
Diagrammi di redditività: punto di pareggio.

Dati per costanti i costi variabili, dal diagramma si deduce che i costi fissi determinano in maniera sostanziale il punto di pareggio. Costi fissi elevati richiedono la produzione e la vendita di maggiori quantità di prodotto. Il rapporto costi variabili/costi fissi è detto **grado di rigidità della struttura aziendale**.

Le aziende industriali hanno, rispetto alle imprese commerciali, costi fissi elevati (macchinari, stabilimenti ecc.) per cui, in caso di riduzione dei ricavi (minore inclinazione della curva dei ricavi totali) e quindi spostamento del punto di pareggio verso destra, hanno maggiori difficoltà a compensarlo con una riduzione dei costi fissi e in genere subiscono perdite.

La convenienza della produzione di singoli prodotti viene valutata calcolando un indice detto **margine lordo di contribuzione** (MLC), tale margine si calcola sottraendo dai ricavi di vendita i costi variabili:

$$\text{MLC} = \text{Ricavi di vendita} - \text{costi variabili}$$

Viene così ottenuto l'ammontare dei ricavi che deve coprire i costi fissi.

Questo parametro da solo non è però sufficiente per effettuare una scelta, è necessario calcolare anche il **margine di contribuzione unitario** per ogni prodotto, che si ottiene dividendo il margine di contribuzione lordo per il numero di prodotti costruiti. Questa analisi permette di individuare i prodotti con il miglior margine di contribuzione unitario e che producono, quindi, maggior reddito. Le politiche di incremento delle vendite dell'impresa (di marketing) si orienteranno maggiormente verso questi prodotti.

PER FISSARE I CONCETTI

1. In base a quali principi deve essere redatto un bilancio di esercizio?
2. Quali documenti formano il bilancio?
3. Le voci dello Stato Patrimoniale sono suddivise in attività e passività. Descrivi le voci principali.
4. Come possono essere classificati i costi aziendali?
5. Come si determina il prezzo di vendita di un prodotto?

CAP 28 MARKETING

1 Concetto di marketing **2 La promozione vendite**

Concetti chiave

- Primato dell'utilizzatore
- Bisogni
- Costi
- Tempi di consegna
- La marca (branding)
- Promozione vendite

1 CONCETTO DI MARKETING

Il marketing è il modo di concepire e mettere in pratica, in funzione dei bisogni attuali o potenziali del consumatore e delle strutture di mercato, l'insieme di attività che hanno per oggetto: la creazione e l'adeguamento di prodotti e servizi; la strategia commerciale; la messa in opera dei mezzi necessari per l'applicazione di questa strategia.

Questa definizione di marketing dà priorità alla domanda più che all'offerta. Si deve conoscere a fondo il mercato e le caratteristiche dell'utilizzatore potenziale, scoprire i bisogni dei futuri acquirenti e mettere in opera i mezzi adeguati alla conquista del segmento di clientela che interessa.

Il marketing per i prodotti di largo consumo e quello per i prodotti per l'industria è sostanzialmente analogo, ciò che cambia sono i mezzi. I prodotti per l'industria non necessitano di tecniche di vendita troppo aggressive o dirette, come invece avviene per i prodotti di larga diffusione. Da queste prime considerazioni emerge il **primato dell'utilizzatore**.

La pubblicità e le pubbliche relazioni sono strumenti tradizionalmente utilizzati per posizionare i prodotti e per la promozione delle vendite.

Tipi di prodotto

È possibile classificare i prodotti secondo una gerarchia:

— materie prime, sono quelle provenienti dalla natura (carbone, caffè, cacao ecc.);
— materiali di base, sono dei semilavorati, cioè prodotti ottenuti dalle materie prime modificandone il loro stato originario, come laminati, prodotti chimici intermedi (acido solforico);
— prodotti semifiniti, per esempio la lavorazione di una materia plastica per creare un paraurti che poi sarà assemblato sulla carrozzeria di un'automobile;
— prodotti finiti, sono i prodotti pronti per la vendita e la consegna all'utilizzatore finale (prodotto tessile, un multimetro digitale ecc.);
— prodotti altamente elaborati, prodotti che prevedono un grado di tecnologia avanzata, che li distingue dai prodotti della categoria precedente (calcolatore elettronico, cellulari di ultima generazione ecc.);
— servizi, come assicurazioni, servizi bancari ecc.

Caratteristiche del prodotto

I prodotti per l'industria sono dei prodotti valorizzati e sono considerati più importanti di quelli di largo consumo, per esempio, una locomotiva rappresenta un valore rispetto a una tavoletta di cioccolato.

I beni strumentali sono destinati a durare nel tempo e devono essere conservati, mentre i prodotti di largo consumo sono destinati a scomparire rapidamente. Per esempio, l'acquisto di uno strumento da parte di un tecnico viene attentamente ponderato, l'acquirente ricerca, al momento dell'acquisto, tutte le possibili garanzie, si rivolge a marche che in acquisti o utilizzi precedenti hanno dato buone prove, cura il prodotto con attenzione e con una costante manutenzione, lo mantiene in buono stato in vista di una possibile futura rivendita.

I prodotti di largo consumo, invece, non obbligano l'acquirente ad adottare una particolare disciplina, se non si trova una certa marca di detersivo, si orienta la scelta su un'altra.

L'acquisto di un bene industriale è considerato un investimento. Una scatola di biscotti richiede un investimento minimo e non coinvolge particolarmente l'acquirente, mentre l'acquisto di un macchinario, come una macchina utensile, richiede una spesa elevata che dovrà essere ammortizzata nel corso di vari anni.

Nella scelta di un prodotto un parametro importante resta il prezzo. Nei prodotti industriali talvolta il prezzo è talmente elevato che non si può ipotizzare l'acquisto e si utilizzano altre forme come, per esempio, l'affitto. Per contro, i prodotti di largo consumo hanno un costo unitario di norma accessibile.

Caratteristiche dei clienti

Per i prodotti industriali il cliente è quasi sempre un'impresa, per cui non si ha a che fare con individui, ma con collettività e, quindi, bisogna interloquire con molte persone; vi è una gerarchizzazione delle influenze e in genere la decisione di acquisto è collegiale.

Anche per i beni durevoli di uso familiare, per esempio il frigorifero, la decisione, se il nucleo familiare è composto da più persone, non è presa da un singolo ma è collegiale (marito e moglie).

La clientela dei prodotti di largo consumo passa da una marca a un'altra con facilità, invece nel settore industriale la clientela è esigente: guarda e controlla tutto, studia e confronta e prende una decisione con attenzione, perché un errore può anche costare l'avvenire dell'impresa. Per i beni industriali non esiste l'impulso d'acquisto, così frequente per i prodotti di uso comune. Gli specialisti dell'azienda si sforzeranno di giudicare in funzione di criteri oggettivi: esigeranno referenze, garanzie e prenderanno tempo per riflettere.

La clientela del prodotto industriale è quindi una collettività sensibile agli argomenti tecnici, alle qualità intrinseche e oggettive del prodotto e che prende le proprie decisioni solo dopo aver esaminato attentamente le prestazioni dello stesso; solo la necessità la spinge ad acquistare i prodotti necessari per la vita dell'azienda.

L'analisi delle motivazioni all'acquisto permette di evidenziare i punti chiave, brevemente sottoelencati, che determinano la scelta di una marca di prodotti industriali.

- I **bisogni**. Se un'azienda non ritiene di aver bisogno di un particolare macchinario non prenderà in considerazione l'investimento, mentre se necessita di un prodotto, per esempio deve riprodurre molti documenti, cercherà sul mercato una fotocopiatrice completa, efficace ed efficiente.

- I **costi**. Parametro fondamentale perché incide direttamente sul prezzo finale. Un acquirente di materie prime, per esempio, legherà i suoi acquisti all'andamento del prezzo di mercato.

- I **tempi di consegna**. Le imprese operano secondo piani di produzione prestabiliti per cui le materie prime e i semilavorati devono essere disponibili quando servono alla linea di produzione che, quindi, non può sopportare il minimo ritardo di consegna.

- Le **prestazioni tecniche**. Il sistema deve rispettare le specifiche tecniche previste nel suo utilizzo. Un sistema di refrigerazione mal funzionante è inutile e danneggerebbe la merce. La qualità di un'installazione elettrica di un forno e delle sue parti accessorie determina il suo corretto funzionamento e la qualità dei prodotti dell'azienda che lo utilizza.

- La **costanza**. I prodotti, durante la loro esistenza devono essere conservati in modo perfetto; per esempio, un bene strumentale non deve subire alterazioni durante il funzionamento, i prodotti di base che utilizza devono avere proprietà costanti se a sua volta vuole produrre beni a qualità costante.

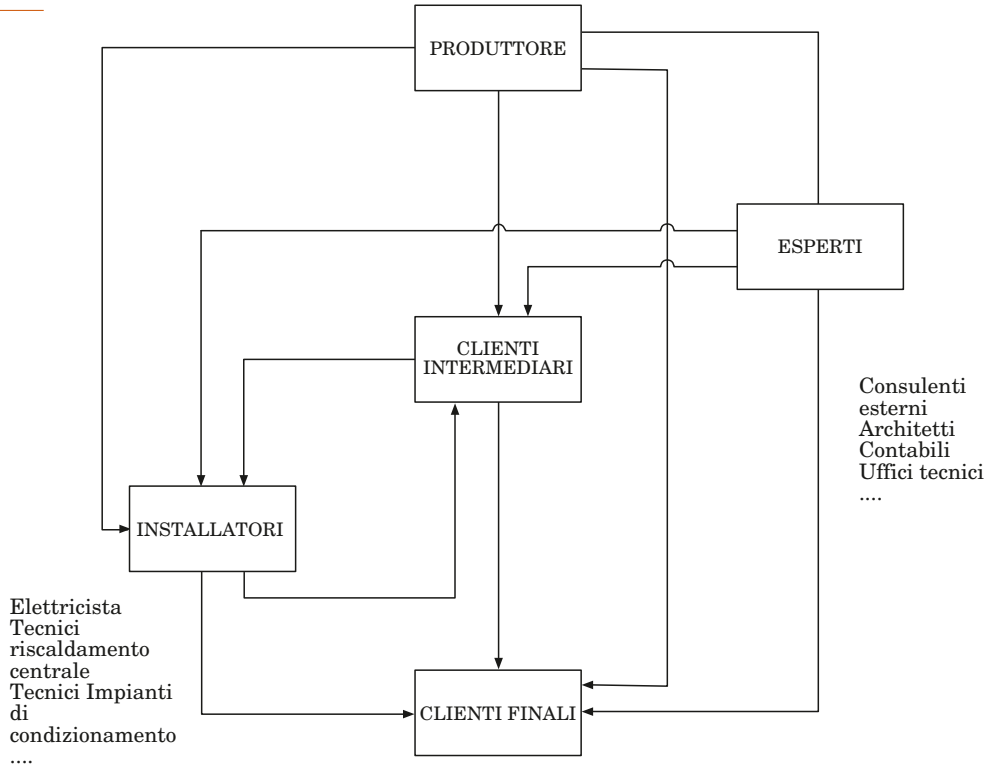
  Altri criteri sono:
  — la conoscenza della marca;
  — la certezza di potersi approvvigionare (si ricorda la necessità di utilizzare nei progetti elettronici prodotti costruiti da più produttori);
  — la novità dei prodotti, il servizio post-vendita.

  Nei rapporti dell'impresa con il suo mercato (▸ ***Fig. 28.1***), essa è sottoposta all'azione di un gran numero di agenti influenzanti che le forniscono suggerimenti specialistici e la aiutano nella decisione. Nella scelta è dunque necessario tener conto dei rapporti che possono accelerare o ritardare la scelta. Le influenze possono essere all'interno dell'azienda ma anche all'esterno, per esempio, installatori, esperti, consulenti ecc.

  Il cliente finale riceve informazioni, consigli e suggerimenti da tutti coloro che intervengono nel rapporto commerciale:
  — il produttore tenta di sensibilizzarlo contattandolo direttamente o mediante la pubblicità;
  — l'esperto viene a contatto con lui per motivi professionali, per motivi attinenti al prodotto;
  — il dettagliante per cercare di realizzare la vendita, gli illustra le qualità e i meriti del prodotto;
  — l'installatore, a fronte di un parere richiesto per la messa in opera dell'apparecchiatura o della macchina.

  In azienda l'acquirente che prenderà la decisione finale è soggetto all'influenza di tutti coloro che direttamente o indirettamente sono interessati all'acquisto. Alcuni manifesteranno interesse ai temi commerciali, altri agli aspetti tecnici e altri ancora all'incidenza finanziaria. Questi parametri, talvolta in contrasto fra loro, sono tutti importanti e bisogna tenerne conto.

Fig. 28.1
Figure professionali che influenzano le decisioni di acquisto di un'impresa.



Caratteristiche del produttore

La struttura industriale dell'Italia è largamente dominata dalla piccola e media impresa, mentre le grandi imprese sono relativamente poche. I grandi gruppi industriali sono costretti per le loro dimensioni a cercare continuamente nuovi sbocchi commerciali e ad affrontare ovunque un'attiva concorrenza; dispongono però di considerevoli mezzi finanziari, tecnici e umani.

Le medie e piccole industrie mancano di dinamismo perché presentano una serie di fattori negativi.

1. La **scarsità di mezzi finanziari** che impedisce di attrezzarsi adeguatamente e di offrire retribuzioni in grado di attrarre collaboratori di valore.
2. La **scarsità di conoscenze** che fa sì che si dia importanza al giudizio intuitivo e personale. Il punto di vista dei tecnici prevale su quello commerciale dell'impresa ed è difficile verificare se i prodotti da fabbricare corrispondano veramente a un mercato e se gli sbocchi siano validi.
3. La **debolezza delle strutture**. Sono spesso aziende familiari, con un'organizzazione debole e sovente con la forza di vendita esterna alla società (rappresentanti non esclusivi), che fa sì che venga a mancare quell'attaccamento all'azienda che fa la forza delle imprese ben strutturate.
4. La **scarsa redditività** che deriva sia dal carattere spesso marginale della loro attività, sia da una cattiva gestione della politica commerciale, che sovente mette in condizione l'azienda di essere soggetta a seri problemi finanziari.

5. La **debolezza del loro marketing**. Queste imprese in genere considerano la commercializzazione un problema secondario. Non fanno pubblicità, non fanno promozioni vendite. Talvolta non hanno neppure un prodotto pilota.

Le medie imprese peraltro presentano anche caratteristiche positive.

1. Una **grande flessibilità**. La struttura amministrativa e burocratica è leggera e permette rapidi cambiamenti e adattamenti alle variazioni di mercato.
2. L'esistenza di un solo titolare fa sì che le **decisioni siano prese rapidamente**, con poche riunioni e senza discussioni superflue. Il clima in azienda è più umano, e i contatti sono più calorosi sia all'interno della società, sia all'esterno nei rapporti commerciali con i clienti.
3. La **responsabilità verso l'impresa** che il titolare ha creato, è sentita più profondamente, per cui decisioni pesanti per il futuro dell'impresa vengono maggiormente ponderate.
4. Il **numero di clienti** è **più ristretto**, per cui è possibile trattare in modo personalizzato e migliorare il servizio fornito.

Lo sviluppo delle imprese industriali

Nelle aziende, la necessità di rendere redditizia la gestione non è avvertita solo come applicazione di una politica di profitto, ma è anche percepita come una questione vitale, suscettibile di provocare l'espansione dell'impresa o la sua morte. Lo sviluppo è quindi una necessità.

La concezione dei prodotti

Le imprese che realizzano prodotti per l'industria hanno sbocchi commerciali ridotti e una clientela ristretta che possono perdere se un concorrente offre prezzi più bassi. L'innovazione tecnologica può rendere obsoleti certi materiali o apparecchiature che fino a poco prima erano considerati modernissimi.

La risposta dell'impresa deve essere un continuo adattamento che si esprime con il lancio continuo di nuovi prodotti che corrispondano realmente con le necessità del momento.

Peraltro ogni impresa ha la necessità di posizionarsi in modo specifico, per evitare una concorrenza troppo aggressiva e diretta; ciò richiede la creazione di prodotti unici di cui l'azienda deve avere l'esclusiva, così la clientela le resterà fedele anche quando lancerà prodotti senza originalità

L'azienda non deve fabbricare prodotti senza avvenire e utili solo a soddisfare l'amor proprio dei tecnici della società, ma deve produrre prodotti originali, adatti a soddisfare un'importante domanda potenziale e in grado di offrire un margine di profitto significativo.

Ogni nuovo prodotto è frutto di:

— ricerche metodiche che accrescono il capitale conoscitivo dell'azienda, il cosiddetto R&D (Research and Development-Ricerca e sviluppo), cuore dell'attività di sviluppo innovativo delle aziende. L'attitudine e l'inventiva di mettere a punto nuovi prodotti non sono qualità comuni, per cui le aziende devono cercare di avvalersi dei migliori tecnici per studiare e creare novità. L'assunzione di ricercatori di alto livello che daranno risultati dopo anni costituisce un investimento che difficilmente può essere sostenuto da una media azienda;

— sfruttamento di brevetti acquistati all'estero; in questo modo si dispone di prodotti già sperimentati e facilmente commercializzabili;
— andamento della domanda; non si deve seguire una moda, ma saper individuare bisogni permanenti; è fondamentale individuare i gusti e adattare le forme alle mutate condizioni;
— selezione di prodotti complessi; il servizio post-vendita è l'elemento essenziale per i beni strumentali, più il prodotto è elaborato maggiori sono le probabilità che si affermi sul mercato. L'impresa deve individuare prodotti specifici di cui il cliente non può fare a meno.

Per le piccole e medie imprese una soluzione ai problemi esposti è di consorziarsi o raggrupparsi per settori professionali o geografici. Le imprese devono essere complementari e non direttamente concorrenti, oppure simili ma operanti su mercati geograficamente differenti.

Le imprese possono anche finanziare delle ricerche in comune, formare un ufficio studi autonomo che lavori in modo indipendente ma per due o tre aziende. In questo caso, nella fase di creazione del prodotto, si compiono ricerche tecniche in comune (per esempio, si acquistano strumenti di misura); si elaborano studi di mercato congiunti (in una sola ricerca si combinano più domande); si acquisiscono brevetti e licenze in comune; si eseguono ricerche commerciali comuni (volendo esportare all'estero si delega, per esempio, un unico rappresentante), si raccolgono informazioni sulle nuove tecnologie (presso fiere utilizzando un unico delegato), si effettuano acquisti collettivi (materie prime, macchine utensili).

La vendita dei prodotti

L'azienda che offre al mercato prodotti validi e concepiti in accordo alla domanda del mercato stesso, deve garantirsi, nel medio termine, una clientela fedele.

Una soluzione è delineare un mercato ben definito e rivolgersi a clienti opportunamente individuati; l'impresa deve quindi avvalersi di una precisa politica di clientela e dotarsi dei mezzi per conquistarla.

Si pensa talvolta che basta lanciare sul mercato un prodotto valido per venderlo, in realtà l'azienda deve disporre anche di una solida forza di vendita.

La vendita è la risultante di un insieme di azioni.

- Il prodotto (*product*). Deve corrispondere a un bisogno del mercato e deve essere creato a seguito di ricerche e test.
- Il prezzo (*pricing*). La clientela del prodotto industriale è molto sensibile al costo, per cui l'azienda fornitrice deve praticare attente politiche di prezzo.
- La marca (*branding*). Richiede una scelta: utilizzare la ragione sociale dell'impresa (Buitoni) o dotare i vari articoli di marche diverse (Mulino Bianco ecc.).
- La distribuzione (*distribution*). Commercializzazione diretta o tramite intermediari.
- La pubblicità (*adversing*). Si vuole migliorare la notorietà dell'impresa sul mercato.
- La promozione vendite (*sales promotion*). Come accelerare il processo di commercializzazione?

Tutti questi fattori vanno applicati per agire in senso positivo sulla clientela potenziale. Il prodotto deve essere confacente ai bisogni, il prezzo considerato accessibile, la marca conosciuta e apprezzata, la distribuzione agevole, la pubblicità suscitare il desiderio di acquistare e la promozione vendite superare le ultime resistenze del cliente all'acquisto.

Per i prodotti di massa, la pubblicità è importante per toccare un vasto pubblico, utilizzando i mass media (giornali, televisione, radio, Internet) che in un colpo solo sensibilizzano milioni di potenziali clienti.

Per i prodotti industriali, la pubblicità è meno importante rispetto all'attività di promozione vendite, perché la clientela dei prodotti industriali è limitata e solitamente ben conosciuta, apprezza il contatto personale che riflette la volontà del produttore di servirla con i riguardi che le sono dovuti.

L'azione pubblicitaria suscita il desiderio di acquisto, ma non convince in profondità, si accontenta cioè di attirare l'attenzione, di suggerire, di evocare. La clientela dell'industria, invece, desidera un'informazione completa su apparecchi e macchinari che desidera acquistare. La pubblicità tradizionale non è sufficiente, bisogna fornire documentazione, e il cliente ha bisogno del contatto diretto con il prodotto: desidera provarlo, esaminarne il meccanismo, giudicare in concreto il funzionamento.

Il costo del prodotto, come si è visto, è un fattore all'acquisto determinante, pertanto i margini di profitto sono limitati e non permettono di investire somme impegnative per la pubblicità. Il costo delle campagne pubblicitarie è tale che le imprese preferiscono la promozione vendite.

2 LA PROMOZIONE VENDITE

La promozione vendite è un insieme di tecniche che vanno a completare le vendite e la pubblicità; essa incita l'utilizzatore ad acquistare e il dettagliante a essere più efficiente con azioni limitate nel tempo e nello spazio per generare un vantaggio supplementare.

Il processo di acquisto nel mercato dei prodotti industriali, come si è già detto, è molto lento, per cui il compito della promozione vendite è quello di ridimensionare le idee preconcette e le esitazioni di ogni genere.

Il primo passo consiste nel dotare la propria azienda di una precisa politica di sviluppo. Sul piano commerciale si elaborerà un piano di marketing nel quale verranno fissati gli obiettivi specifici per ogni settore (produzione, pubblicità, promozione vendite ecc.)

La promozione vendite interviene a livello comportamentale per neutralizzare freni e atteggiamenti negativi dovuti all'inerzia, all'abitudine, ai pregiudizi ecc.

Le azioni da intraprendere per raggiungere gli obiettivi coinvolgono una serie di soggetti a vari livelli: la forza vendite, gli esperti che collaborano con l'azienda, gli installatori, gli intermediari, gli utilizzatori (▸ ***Tab. 28.1***).

Le azioni che la **forza vendite** deve intraprendere sono:

1. informare in modo completo i venditori/rappresentanti dell'impresa. È un'azione particolarmente importante soprattutto nel caso in cui essi non siano dei tecnici; il rischio è di perdere delle vendite se non si è in grado di spiegare correttamente il funzionamento di un nuovo siste-

Tabella 28.1 Promozione vendite: processo di informazione nelle fasi di pre-vendita, vendita e post-vendita

PRE-VENDITA	VENDITA	POST-VENDITA
PUBBLICITÀ – Creare un clima favorevole – Divulgare un'informazione motivante – Preparare gli animi ↓ PROMOZIONE VENDITE – Facilitare il contatto – Permettere la dimostrazione concreta	VENDITA VERA E PROPRIA ↑ PROMOZIONE VENDITE – Personalizzare il contatto – Rinforzare la qualità della vendita	PROMOZIONE VENDITE – Assicurare il servizio post-vendita – Garantire la fedeltà

ma: si dovranno quindi predisporre sistemi di informazione facilmente assimilabili (riunioni con sussidi audiovisivi) e facilmente comunicabili ai clienti (documentazione, siti Internet ecc.);
2. dare vigore alla forza vendite. L'azione può essere rafforzata fornendo nuovi prodotti, che superino l'abitudine e l'inerzia, nuovi argomenti commerciali, nuove forme pubblicitarie e promozionali ed incentivando i risultati;
3. spingere la promozione di un certo prodotto;
4. incitare la clientela ad effettuare prove;
5. spingere i venditori/rappresentanti a cercare e visitare nuovi clienti;
6. spronare la forza vendite a sfruttare meglio gli strumenti di vendita, cioè trovare il modo migliore per prendere contatto con i clienti e mostrare loro i progressi tecnici dell'azienda;
7. far sì che i venditori/rappresentanti non si limitino a completare la loro missione di vendita, ma che a loro volta facciano pressione sugli intermediari perché promuovano la marca.

A livello degli **esperti**, cui l'impresa chiede pareri tecnici, le azioni riguardano l'informazione sulle realizzazioni della società, che devono essere precise e oggettive in modo da spingerli a raccomandare l'uso dei prodotti dell'azienda alle persone cui abitualmente danno consigli.

Gli **installatori**, come gli esperti, si trovano spesso, durante l'esecuzione dei lavori, nella condizione di fornire consigli alla clientela. È necessario che essi abbiano una buona immagine della marca e dei prodotti e che impieghino di preferenza i prodotti della società.

Gli **intermediari** sono un anello importante del ciclo di commercializzazione e da essi che dipende il buono o cattivo lancio di un prodotto sul mercato. È di fondamentale importanza che i grossisti sostengano gli intermediari invitandoli a sfruttare efficacemente la pubblicità e che si impegnino nella distribuzione alla clientela della documentazione tecnica e illustrativa, migliorando la visibilità del prodotto e gli spazi espositivi. L'impresa inoltre deve supportare gli intermediari surrogandoli nelle mancanze nei riguardi del cliente finale, infatti, molte vendite vengono perdute per l'incompetenza del commesso del dettagliante.

Gli **utilizzatori** devono essere incentivati a provare il prodotto, a superare certe idee preconcette, soprattutto nel caso che un'azienda affermata in un settore industriale (per esempio, strumenti di misura) si lanci

in un settore nuovo e non correlato (per esempio, produzione di semiconduttori). In questo caso anche i clienti più fedeli diventano diffidenti nei confronti dei nuovi prodotti. L'ostacolo maggiore per l'utente è però la sua incapacità a rompere abitudini consolidate. È necessario convincere il cliente che il servizio offerto è completo, che il servizio post-vendita è solido e affidabile; che le condizioni finanziarie offerte per l'acquisizione del prodotto sono valide e convenienti; che l'impresa assisterà gli utilizzatori nella messa in opera dell'apparecchiatura.

Lo studio degli obiettivi promozionali descritti permette all'impresa di evidenziare sia i singoli problemi sia le difficoltà reali.

Il piano di promozione vendite si concretizza in un documento in cui si registrano le decisioni aziendali e si indicano chiaramente gli obiettivi che si sono fissati per l'esercizio successivo e l'entità del budget finanziario stanziato.

Per operare una solida strategia promozionale delle vendite, è necessario che gli strateghi individuino fin dall'inizio quali mezzi non sono adatti al raggiungimento dello scopo che ci si è prefissati.

Alcuni mezzi potrebbero rivelarsi: troppo sfruttati e, quindi, banali; più adatti a campagne rivolte al "grande pubblico"; non in grado di risolvere i problemi, per esempio, l'applicazione di una mera riduzione di prezzo non sarebbe sufficiente a creare fedeltà al prodotto; poco apprezzati dalla clientela che interessa all'impresa, come si può, per esempio, dedurre dalla deludente e scarsa efficacia di una campagna intrapresa da un'impresa concorrente; generatori di costi troppo elevati; troppo onerosi perché potrebbero richiedere l'impiego di molto personale; un successo e, di conseguenza, possono provocare un'ondata di ordini che l'azienda sa di non essere in grado di evadere.

Questi esempi mostrano che la promozione delle vendite è una operazione complessa che va preparata adeguatamente, che richiede conoscenza dei mezzi utilizzabili ed esperienza nella loro applicazione al mercato industriale.

Un primo approccio suggerirebbe di attivare procedure di incentivazione che operino su tutti i soggetti interessati: forza di vendita, esperti, installatori, intermediari, utilizzatori, ma ciò è possibile solo in teoria perché in pratica le risorse a disposizione (budget) sono limitate, per cui solo alcune azioni possono essere intraprese e si dovrà perciò fare una scelta gerarchica attribuendo alcune priorità.

Ogni livello di commercializzazione ha una sua precisa responsabilità; il ruolo del fabbricante è di produrre un bene di qualità, quello del dettagliante di assicurarne la diffusione agli utenti finali. Le difficoltà nascono quando gli intermediari non svolgono in modo efficace il loro incarico. La promozione vendite obbliga il produttore e gli intermediari ad assumersi forti responsabilità e a migliorare i rispettivi risultati.

I maggiori problemi per un'impresa vengono dagli uomini della forza vendite che frequentemente mostrano segni di affaticamento, scarso interesse per il lavoro e limitata combattività nei rapporti con la clientela, insufficienti o mal assimilate informazioni, cattiva utilizzazione degli strumenti di vendita, incompleta formazione tecnica di base che provoca frequenti errori.

Va ricordato che la persona che rappresenta la società deve corrispondere appieno all'immagine che la sua azienda vuole trasmettere, deve

quindi mostrare un addestramento rigoroso, una preparazione completa sia sul piano tecnico sia commerciale.

Nel trattare con gli esperti che, come abbiamo già scritto, operano come consulenti, l'azienda trova difficile imporre il proprio punto di vista. Proprio la posizione di terzo pone il consulente in una condizione di prestigio e gli conferisce una certa autorità. Si tratta quasi sempre di liberi professionisti, di specialisti e di tecnici in possesso di lauree e diplomi che attestano la loro preparazione nel settore industriale di competenza, che vengono consultati dalle imprese per problemi che coinvolgono il futuro dell'impresa. Ci si aspetta da loro giudizi totalmente obiettivi giustificati dal disinteresse commerciale. Per ottenere la collaborazione di questa categoria di persone si deve offrire un'informazione seria, obiettiva e scientifica. Deve essere, però, una promozione discreta perché con questi professionisti non è opportuno far pensare che si persegua uno scopo puramente commerciale, è una conquista lenta basata su prove tangibili, dimostrazioni concrete, garanzie irrefutabili.

Gli installatori hanno un contatto diretto col cliente finale e gli argomenti della comunicazione devono essere essenzialmente di tipo tecnico, con l'obiettivo, che ogniqualvolta se ne presenti l'occasione, loro consiglino la marca propagandata.

Gli intermediari che distribuiscono i prodotti dell'azienda sono un elemento essenziale della campagna di vendita. Il produttore deve tenere presente che non sempre i suoi interessi coincidono con quelli del distributore. Il produttore è l'innovatore, il creatore, l'inventore, colui che trova nuove applicazioni, il distributore esercita un ruolo puramente materiale, di esecutore o diffusore. Vi è poi una distorsione in termini di risorse: alla forza del produttore si contrappone la debolezza del distributore. Questa posizione è evidente nel settore dei prodotti di largo consumo.

I distributori di prodotti industriali sono spesso esclusivisti e, quindi, sono interessati a difendere la marca che hanno in magazzino. Il produttore deve quindi agire sul distributore cercando di superare gli aspetti negativi tipici quali: una certa indolenza dell'intermediario, un'ignoranza degli argomenti tecnici, una mancanza di vitalità dei rivenditori, la non utilizzazione degli strumenti pubblicitari.

È necessario creare e sviluppare un contatto umano e uno scambio di idee, favorendo il coordinamento delle azioni dell'industria con quelle del distributore.

L'utilizzatore si avvale di consiglieri specializzati che influiscono sulla decisione finale, per cui l'impresa deve imparare a conoscere l'utilizzatore finale, le sue abitudini e le sue motivazioni, le fonti di influenza e il tipo di argomenti cui sarà sensibile.

Le resistenze classiche (inerzia naturale, paura di affrontare dei rischi, forza dell'abitudine, esagerata ricerca di sicurezza, indifferenza di fronte ad altri argomenti, idee preconcette ecc.) costituiscono un freno all'impatto del messaggio pubblicitario. La promozione dovrà spingere, con azioni specifiche, l'utilizzatore alla prova e all'acquisto dei prodotti e alla fedeltà al marchio aziendale.

Le azioni promozionali

Le azioni promozionali richiedono un'attenta pianificazione che richiede più fasi:

— l'ideazione; si fa un censimento dei mezzi promozionali che si possono mettere in campo, e fra essi si opererà una scelta in funzione degli obiettivi da raggiungere e del budget disponibile per l'operazione (per esempio, uno stand per una fiera di settore);
— la determinazione delle competenze interne per l'operazione prevista, l'individuazione dei responsabili (interni o esteri), il calendario, le autorizzazioni, l'aspetto legale ecc.;
— il coordinamento di ogni azione con le altre azioni intraprese dalla società (commerciali, pubblicitarie ecc.), per esempio trarre vantaggio da articoli sulla stampa economica o tecnica e sulle riviste professionali.

Il budget deve essere calcolato con precisione valutando tutte le voci (editoria, costi del personale, materiali ecc.) e stabilire un budget definitivo con un'approssimazione del 10%. Si deve accantonare anche un fondo per gli imprevisti.

Queste attività sono guidate da un responsabile che monitorerà le azioni intraprese e che dovrà intervenire, modificandole, quando necessario. Dopo una manifestazione promozionale la forza vendite deve impegnarsi a fondo presso gli intermediari per aumentare il volume delle vendite acquisendo un maggior numero di ordini.

La azioni vengono monitorate ricorrendo a sondaggi presso gli utilizzatori e a interviste durante la campagna di non-clienti e intensificando i contatti con i distributori.

Tecniche di promozione

Si presenta ora una rassegna delle tecniche di promozione più usate.

- **Riunioni a scopo informativo**. Si riunisce in uno stesso posto (alberghi, centro congressi, show-room ecc.) una certa tipologia di destinatari (rappresentanti, rete di vendita, consulenti, installatori, utenti finali) e ci si sforza di comunicare loro un'informazione la più approfondita possibile. Le riunioni possono avere carattere locale, nazionale o internazionale, per piccoli o grandi gruppi, diretta e personalizzata; può assumere la forma di seminario, riaddestramento, stage tecnico, convenzione, cocktail, congresso ecc. L'informazione deve poi essere equilibrata: essere tecnica se diretta a ingegneri; parlare di profitti e costi se i presenti sono capi o manager di industria. Tutte queste soluzioni sono dal punto di vista costo/contatto molto costose, ma il bilancio finale è quasi sempre positivo.

- **Viaggi di studio**. In questo caso si offrono ai clienti potenziali viaggi di studio per mostrare installazioni, realizzazioni dell'impresa all'estero, modi di sfruttamento inusuali. Il viaggio può essere interamente offerto o fatto pagare a un prezzo simbolico. Nel primo caso, l'invitato si sente costretto a ricambiare e molti dei partecipanti sono più interessati al viaggio che allo studio dei problemi proposti dal programma. Nel secondo caso, partecipano solo le aziende effettivamente interessate al prodotto e perciò contribuiscono alle spese del viaggio; si sentono libere e quindi partecipano con più convinzione.

- **Visite agli stabilimenti**. È il sistema meno caro e il più facilmente organizzabile. Non sempre però è efficace, in genere è, anzi, negativo: la visita è isolata e non è per niente attraente, il visitatore viene ricevuto da

tecnici poco avvezzi alla comunicazione commerciale, si mostrano laboratori che per il visitatore sono molto meno interessanti del materiale stesso. Di maggiore efficacia è la visita organizzata con utilizzatori potenziali di una stessa località o regione, facendoli viaggiare gratuitamente e insieme, accompagnati dal rappresentante locale, che approfitterà della visita per studiare le reazioni e per insistere su determinati aspetti dell'attività aziendale, che avrà già fatto rilevare ai potenziali clienti nelle visite che hanno preceduto il viaggio, e polarizzerà l'attenzione su specifici materiali adatti a risolvere i problemi riscontrati nella regione rappresentata. Una visita così organizzata darà sempre risultati positivi.

- **Visite alle installazioni**. Questo tipo di visita viene utilizzata quando l'oggetto della produzione sono installazioni di grandi dimensioni (ponti, installazioni termiche, sistemi di refrigerazione ecc.).

- **Centri di informazione aperti al pubblico**. Si può aprire un negozio situato in una zona centrale, dove esporre l'intera gamma delle produzioni dell'azienda, in cui lavorano operatori in grado di soddisfare i bisogni espressi o latenti degli eventuali visitatori. Talvolta questi centri funzionano come **centri di studio** che non si limitano a raccogliere dati, ma cercano di aiutare il cliente a prendere una decisione, fornendo eventualmente preventivi (quasi sempre gratuiti) e degli studi di installazione.

- **Pubblicità diretta**. È la formula più utilizzata per promuovere i beni industriali, in quanto è poco costosa, può essere sfruttata in modo metodico, sensibilizza in modo diretto le persone cui ci si indirizza, può essere facilmente adattata agli scopi che ci si prefigge. La pubblicità diretta richiede la presenza di un'organizzazione interna dedicata, un controllo del rendimento, creazione di elenchi di indirizzi o mailing list, l'ideazione del messaggio. Può essere diffusa per posta ordinaria o elettronica, oppure con il metodo porta a porta; quest'ultimo mezzo può apparire meno selettivo, ma in realtà può rivelarsi efficace per raggiungere persone di cui non si conosce l'indirizzo, ed è utilizzato soprattutto per i prodotti di largo consumo.

- **Équipe di promotori**. Sono rappresentanti incaricati non di vendere, ma di sensibilizzare le persone con cui entreranno in contatto. La natura non commerciale del loro approccio li rende ben accetti alla clientela che è più disponibile a un colloquio. Stabilito il contatto viene loro richiesto che ricordino al potenziale cliente chi è l'azienda per cui lavorano, quale gamma di prodotti o servizi offre, di commentare la documentazione distribuita, di illustrare esempi di applicazioni, di fare qualche domanda e di evidenziare il carattere non commerciale della conversazione. Per essere efficace, questa attività deve essere coordinata con quella dei rappresentanti, i quali devono poi raccogliere ciò che i promotori hanno seminato.

- **La documentazione**. È l'attività specialistica con la quale vengono predisposti materiale corrente puramente descrittivo (pieghevoli, opuscoli, cataloghi, tariffari) e materiale speciale (riviste specializzate, news inviate per posta elettronica ecc.). Il materiale speciale viene prodotto per sviluppare il contatto con il cliente. La documentazione viene realizzata su vari supporti cartacei, su DVD, su file scaricabili dal sito dell'azienda, ma per essere veramente efficace deve essere consegnata personalmente presso le aziende o in occasione di fiere e mostre.

- **La dimostrazione**. È la via principale con la quale si vendono le attrezzature tecniche, poiché la dimostrazione permette di mostrare il prodotto in funzione e di evidenziarne le potenzialità, favorisce le reazioni spontanee della clientela, consente di rispondere al momento alle domande che generalmente vengono poste, permette di mettere in mostra il materiale. Può essere fatta in azienda, presso gli intermediari, nella sede del cliente, nelle fiere, in mostre itineranti ecc.
- **Le fiere-mostra**. Rappresentano per certi settori industriali l'unica vera possibilità di raggiungere in modo efficace la potenziale clientela. Essere presenti talvolta è un modo per l'azienda di comunicare la propria vitalità, per mostrare i nuovi modelli, per avvicinare nuovi potenziali clienti, per contrastare la presenza di grandi imprese straniere che non mancano di presenziare a questi avvenimenti.
- **La pubblicità sul luogo di vendita**. È una modalità praticata per i prodotti di largo consumo e di basso prezzo e favorisce l'acquisto di impulso. Per i prodotti industriali è meno efficace ma contribuisce a dare fiducia al cliente, è di sostegno alla marca ricordando che è conosciuta e che quindi offre una garanzia supplementare, crea un'atmosfera favorevole al prodotto.
- **La presentazione**. L'imballaggio che una volta serviva solo per contenere il prodotto al giorno d'oggi è mezzo di promozione e di informazione. È particolarmente importante per i prodotti di massa. I prodotti industriali spesso non hanno neppure la confezione o un imballaggio (per esempio, una gru, un grosso macchinario) e anche quando è previsto la possibilità di una vendita di impulso è irrealistica. Va ricordato che l'acquisto di un prodotto industriale è quasi sempre collettivo non individuale, è un investimento, si cercano in esso qualità intrinseche e ci si interessa alle sole prestazioni tecniche, per cui la presentazione non è rivolta all'imballaggio ma al prodotto stesso. Si cerca, cioè, di dare al prodotto un aspetto accattivante (di design), si elaborano forme che siano più funzionali e piacevoli esteticamente, per esempio, la linea dinamica e morbida delle moderne locomotive evoca un senso di modernità, di conforto e di velocità. Nel settore industriale, la bellezza è diventata un argomento di vendita. La presentazione in un prodotto industriale non migliora l'informazione ma lo valorizza.

Le azioni di lancio

Le fasi di informazione finora descritte hanno una caratteristica statica. Le esposizioni e le dimostrazioni hanno mostrato il prodotto e il suo funzionamento; i promotori di vendita hanno stabilito il contatto tra l'azienda e la possibile futura clientela; le visite agli stabilimenti e alle installazioni hanno concretizzato la propaganda, ma l'interesse reale viene suscitato passando a una fase più dinamica che obbliga il cliente a conoscere più profondamente il prodotto.

Presentiamo un breve elenco delle tecniche e azioni che favoriscono il lancio dinamico del prodotto.

- **Il campione**. La distribuzione gratuita di campioni, in genere una confezione ridotta, favorisce la conoscenza del prodotto e permette al cliente di apprezzarne la qualità. È un metodo pubblicitario costoso per l'azienda

ed è perciò un metodo che può essere praticato solo da grandi aziende. Il campione è un regalo che viene assai apprezzato dal cliente, permette una o due prove e obbliga quindi il consumatore che ne vuol usufruire all'acquisto. Questo mezzo pubblicitario favorisce l'inserimento del nuovo prodotto nel mercato superando gli ostacoli psicologici che si oppongono al primo acquisto; permette al consumatore di valutare le qualità e le prestazioni del prodotto; dà la quasi certezza che il prodotto sarà effettivamente provato dal cliente, in quanto il pubblico non rifiuta mai ciò che gli viene offerto; assume agli occhi del cliente la percezione che il prodotto offerto è una merce e ha un valore. Le merci che vengono promosse con il metodo del campione sono piccoli articoli industriali (chiodi ecc.), materie prime (orzo, grano, zinco ecc.), accessori, materiali, prodotti finiti a prezzi accessibili (cosmesi), articoli per imballaggio (vetro, carta ecc.).

Per i prodotti industriali, poiché il cliente desidera valutare attentamente ciò che acquista, il campione offerto verrà sottoposto a test di verifica, quindi la quantità di merce consegnata deve essere tale da consentirgli di dare un giudizio obiettivo sul valore del bene, per esempio, un costruttore che riceve un campione di cemento desidera che esso sia sufficiente per costruire una scala. I campioni vengono in genere consegnati alla sede della società, presso gli intermediari, nelle fiere e mostre, in occasione della visita di un promotore presso il cliente.

- **La prova del prodotto**. È usata quando non è possibile distribuire dei campioni; consiste nel consegnare il prodotto al cliente, per un periodo di tempo per consentirgli di provarlo o restituirlo. Si utilizza per i mezzi di trasporto (treni, aerei, autoveicoli ecc.), motori meccanici o pompe, materiale meccanico per l'agricoltura, macchine utensili, strumenti di precisione (apparecchi di misura ecc.), apparecchi per la lavorazione del legno, per il materiale elettrodomestico, per le attrezzature d'ufficio ecc.

  È una tecnica di vendita apprezzata in quanto permette al cliente di sentirsi libero di utilizzarlo come crede, e questo non dispiace al cliente, l'aspetto "regalo" viene percepito in senso positivo. È improbabile che l'azienda, una volta provato il prodotto lo rifiuti, perché nel periodo di prova si è abituata ad utilizzarlo e ne ha apprezzato i servizi.

  La documentazione non fornisce che un'idea incompleta dei vantaggi offerti dall'uso di un'apparecchiatura, una dimostrazione presso una fiera dà una piccola prova delle possibilità di impiego, la prova presso la sede aziendale accresce la possibilità di accettazione da parte del cliente: egli può con tutta comodità scoprirne le qualità (velocità, potenza, affidabilità, sicurezza).

  Talvolta il sistema di prova gratuita, essendo una prospettiva attraente, non permette al produttore di capire se l'interesse da parte del cliente è reale; poiché tale pratica commerciale è costosa in qualche caso si offre la merce in prova, ma a pagamento. La prova a pagamento evita al fabbricante spese inutili e gli permette di offrire la prova solo ai clienti disposti a pagare. La cifra richiesta è simbolica, ma sottolinea che la prova non è gratuita, ciò risulta allettante soltanto per i clienti realmente interessati che, avendo pagato, si sentono meno impegnati nei confronti del fornitore e perciò provano il prodotto senza secondi scopi. Inoltre, l'impresa che ha pagato cercherà di massimizzare l'investimento e proverà a fondo il prodotto o il macchinario cercando di ammortizzare la spesa, il che gli con-

sentirà di valutarlo in modo completo, quindi di giudicarne la qualità. Anche il produttore ne trae dei vantaggi perché riduce i costi del periodo di immobilizzazione del bene presso il cliente. Questa tecnica è utile quando si introduce un nuovo prodotto o si è modificato un prodotto esistente; è largamente impiegata per i prodotti software.

- **Tagliando sconto**. È una tecnica di promozione molto utilizzata per i prodotti di largo consumo, ma è poco utilizzata per i prodotti industriali. Per il consumo familiare si è molto interessati a ridurre i prezzi degli articoli di uso quotidiano, l'industria invece utilizza altri criteri di scelta e un'offerta del genere la lascia indifferente. Talvolta per certi tipi di beni strumentali, come autocarri o autoveicoli, si offre, per periodi determinati, la possibilità di usufruirne a prezzo ridotto. Per essere efficace, però, è necessario che lo sconto applicato sia sensibile, tale da attrarre l'attenzione del cliente e fargli avvertire come un bisogno il desiderio di possedere quel prodotto.

- **Progetti di installazione**. In questo caso, il fabbricante offre al potenziale cliente un servizio di pre-vendita che può prendere la forma di un preventivo, di una consulenza sulle possibilità di utilizzo del materiale, di consigli sul modo d'uso del prodotto, di uno studio dei vantaggi finanziari ottenibili grazie all'installazione di un macchinario o un'apparecchiatura; di possibili sfruttamenti commerciali del processo o prodotto in questione. Lo studio offerto può essere completamente gratuito, o con il rimborso delle sole spese vive, e senza impegno. Alla consulenza si può unire l'offerta del materiale in prova o una dimostrazione completa dell' apparecchiatura presso il cliente.

Azioni di sviluppo

Sono azioni che si mettono in campo per convincere un cliente potenziale a effettuare il primo acquisto. Dopo aver sviluppato le azioni descritte nei paragrafi precedenti la "pressione" sul cliente viene aumentata in modo che il desiderio di acquisto diventi imperioso.

La maggior parte delle tecniche di seguito descritte sono state studiate per promuovere i beni di largo consumo, ma possono trovare applicazione anche con i beni industriali.

- **Il premio**. È un vantaggio supplementare offerto agli acquirenti di un prodotto. Esso può essere diretto, cioè consegnato al momento dell'acquisto, o differito, cioè consegnato dopo vari acquisti, successivi al primo, dello stesso articolo. Esiste una legislazione rigorosa che obbliga l'azienda a offrire solo oggetti di scarso valore intrinseco e concepiti per la pubblicità.
In campo industriale non è possibile offrire oggetti insignificanti, quali porta-chiavi, penne, spille, che non sarebbero certo apprezzati, d'altra parte non è possibile, per limitazioni legislative, offrire oggetti costosi e di valore, per cui si offrono, in genere, accessori che vanno a completare il prodotto, per esempio, all'acquirente di un notebook si regala la valigetta per trasportarlo, oppure si offre un servizio inerente (estensione temporale gratuita della garanzia). Questo tipo di promozione risulta però poco efficace perché l'oggetto aggiunto può essere percepito dal cliente come un caso di vendita accoppiata e il servizio accluso come un servizio di post-vendita e, di conseguenza, comunque dovuto.

- **Il servizio**. Viene messo a disposizione nell'ottica di offrire "un servizio completo" consentendo al cliente di trarre il maggior vantaggio possibile dalle prestazioni dell'articolo in questione e con lo scopo di fidelizzarlo all'azienda. In genere si cerca di collegare il servizio al prodotto e al suo utilizzo, ma è anche possibile che sia un servizio distinto dal prodotto ma inerente all'attività dell'impresa. Di solito viene offerto un servizio di base gratuito, ma ampliabile, dietro pagamento di un canone in genere basso.
  Un breve elenco di servizi offerti potrebbe essere: consigli relativi alla costruzione e alla messa in opera delle apparecchiature, consigli relativi agli sbocchi commerciali o applicativi innovativi; forniture su misura per adattarli alle esigenze della clientela; consegna sotto determinate condizioni (notturne); messa in opera; studio finanziario; informazione al personale; fornitura di accessori: piano di montaggio, manutenzione e riparazione delle apparecchiature.

- **La riduzione del prezzo**. Consiste nell'abbassare temporaneamente il prezzo di un prodotto. I prezzi peraltro dipendono da alcuni obblighi:
  — il prezzo delle materie prime, che sono vincolati da accordi;
  — le quotazioni di Borsa, che determinano i livelli dei prezzi per molti prodotti e materiali;
  — le convenzioni e gli accordi internazionali, che vincolano la scala dei prezzi su certi mercati
  Lo spazio alle variazioni di prezzo che l'impresa può percorrere è quindi limitato e talvolta nullo.
  Questa tecnica non può ragionevolmente essere applicata ai prodotti industriali e presenta una serie di inconvenienti molto negativi.
  Una riduzione del prezzo agli occhi della clientela: viene percepita come una svalutazione del prodotto industriale stesso; non riporta i vecchi clienti alla marca perché questi pensano che la riduzione sia dovuta a un crollo di qualità; non favorisce il primo acquisto in quanto i clienti utilizzano criteri più razionali della sola diminuzione del prezzo; essendo comunque una riduzione di lieve entità, non è decisiva per la scelta del cliente; è poco vantaggiosa per il cliente ma al produttore costa cara, in quanto la quantità di merce in gioco è sempre notevole.
  Quando un industriale si serve di questa formula, la clientela accende tutti i segnali di allarme e comincia a dubitare della solidità del fornitore.
  In genere, si preferisce agire su altre variabili che non il prezzo, per esempio, si agisce sulle condizioni di vendita; si concedono dilazioni di pagamento, si attuano riduzioni di prezzo in funzione delle quantità ordinate, dei tempi di consegna richiesti, dei diversi tipi di prodotto acquistati.

- **Le operazioni di "resa"**. È una forma mascherata di riduzione di prezzo che consiste nel ritirare il prodotto obsoleto, di qualunque marca sia, al momento dell'acquisto di un nuovo prodotto.
  Molti beni strumentali, grazie al continuo progresso tecnologico, diventano obsoleti ancor prima che il cliente abbia finito di pagarli.
  Per il costruttore, l'operazione consiste nel pubblicizzare che accetta di riprendere il materiale obsoleto a un determinato prezzo da accreditarsi per l'acquisto di un nuovo modello di propria produzione.
  Questa operazione di resa è complessa in quanto coinvolge molti operatori, il fabbricante, i rappresentanti e gli intermediari, incaricati della rac-

colta e della ridistribuzione del materiale raccolto o della sua distruzione. Questo sistema è uno dei mezzi migliori per rinnovare tecnologicamente un parco di materiale esistente (telefoni cellulari, personal computer, motocicli, autovetture, macchine per ufficio ecc.).
Gli utilizzatori sono soddisfatti, pena una piccola perdita, di poter acquistare modelli nuovi.

- **I giochi e i concorsi**. Sono molto utilizzati per promuovere i beni di largo consumo. Qualsiasi gioco o concorso crea un clima di simpatia che facilità le trattazioni commerciali.
  Anche le imprese possono utilizzarlo per incentivare i rappresentanti, gli intermediari e la clientela. Si può premiare un rappresentante che ha conquistato il maggior numero di clienti, che ha raggiunto gli obiettivi di vendita assegnati, che ha sviluppato la cifra d'affari ecc.
  L'intermediario può essere stimolato con un questionario sulle qualità dei prodotti aziendali, stabilendo un premio per quelli compilati in modo più completo. Lo scopo è di obbligare l'intermediario a studiare la documentazione e di scoprire le performance del materiale; in altre parole si cerca di migliorare le prestazioni della rete distributiva.
  A livello degli utilizzatori si può ottenere una migliore consapevolezza delle qualità del prodotto e quindi una maggiore fidelizzazione.

- **Le vendite multiple**. Si creano confezioni multiple che riuniscono più unità di uno stesso prodotto. È un metodo molto usato per i prodotti di largo consumo, che il pubblico acquista in piccole quantità. Questo sistema lo obbliga a fare acquisti più incisivi e quindi a sviluppare i suoi consumi.
  Questa formula non ha concreta applicazione in ambito industriale, perché gli acquisti vengono programmati su lunghi periodi e per quantità significative.

- **Gli abbinamenti**. È una particolare tipologia di vendita multipla con la quale si propone al cliente l'acquisto di un gruppo di prodotti diversi venduti complessivamente a un prezzo inferiore a quello abituale. Questa azione trova qualche applicazione in aziende che dispongono di molti prodotti industriali e che desiderano farli conoscere; è necessario però che fra i vari prodotti vi siano legami diretti.

Le azioni di supporto

Sono azioni che l'azienda mette in atto per sviluppare le proprie relazioni pubbliche e dare un'immagine positiva di sé.

- **Le manifestazioni**. Le aziende, soprattutto quelle che producono prodotti di largo consumo, partecipano a manifestazioni pubbliche, folcloristiche, commerciali, sportive, culturali che il pubblico ben conosce. Per i prodotti industriali è difficile trarre utilità da questo tipo di sponsorizzazioni.

- **Le operazioni pubblicitarie**. Sono organizzate nell'ambito di manifestazioni pubbliche e utilizzano concorsi, giochi, carovane pubblicitarie, stand. Le uniche società che possono trarre vantaggio da queste partecipazioni sono quelle del settore dei servizi (assicurazioni, banche ecc.) che in queste occasioni possono avvicinare una potenziale clientela.

- **Le attività di animazione sul punto vendita**. Questo metodo, largamente utilizzato per i beni di grande consumo, è, talvolta, conveniente anche per le imprese, che possono, allestendo uno stand con hostess e dimostratori presso il punto vendita del proprio rivenditore, informare e fare dimostrazioni pubbliche, impiegando materiale audiovisivo o consegnando regali. Le formule utilizzate parlano di "Giornata di informazione di…", "Centro temporaneo di documentazione di…", in questo modo, per attrarre la clientela verso il negozio, si cerca di dare l'immagine che la volontà sia di fornire informazione pura.

- **I regali**. Sono doni che le aziende distribuiscono in occasione di visite alle sedi o agli stabilimenti, durante le fiere, nel corso di manifestazioni commerciali, in occasioni di certi anniversari (per esempio, dieci anni di attività). Questi gesti trovano sempre apprezzamento presso gli esperti, i rivenditori e la clientela.

- **Le associazioni**. Si costituiscono club a cui il cliente si iscrive e riceve una tessera a punti che dà diritto a certi sconti, a vantaggi commerciali, a maggiori informazioni. L'azienda in questo modo fidelizza il cliente mediante un vero è proprio ingranaggio, da cui è difficile sfuggire. È poco adatto però per i prodotti industriali, in quanto, come si è già scritto, gli acquisti sono un atto collettivo e non individuale.

- **I premi**. Si tratta di una specie di concorso con il quale l'azienda offre un premio alla migliore realizzazione in un dato settore a giudizio di una giuria di esperti del settore. In questa operazione l'interesse commerciale dell'impresa non è evidente, ma la stessa potrà sfruttarla sul piano delle pubbliche relazioni. L'impresa inviterà giornalisti della stampa tecnica, locale e nazionale per dare risonanza all'iniziativa e aumentare in modo sensibile la sua notorietà.

PER FISSARE I CONCETTI

1. Che cos'è il marketing?
2. Quali sono le caratteristiche di un cliente di un prodotto industriale?
3. Quali linee guida bisogna seguire nella concezione dei prodotti?
4. La vendita è la risultante di un insieme di azioni. Quali?
5. Qual è la funzione della promozione vendite?
6. Qual è la principale differenza fra le operazioni di promozione delle vendite di un prodotto di largo consumo e un prodotto industriale?

CAP 29 LA QUALITÀ NELL'IMPRESA

1 La qualità totale
2 Le norme UNI EN ISO 9001:2008
3 La certificazione di qualità

Concetti chiave

- Qualità
- Aspettative e soddisfazione del cliente
- Norma ISO 9001:2008
- Piano della qualità
- Responsabile della qualità
- Total Management Quality
- Certificazione di qualità
- Manuale della qualità
- Marchio qualità

SINTESI DEL MODULO N

CAPITOLO 27

Il bilancio d'esercizio è un importante strumento di comunicazione aziendale. Esso fornisce a tutti i soggetti interessati all'andamento dell'impresa (*stakeholder*) informazioni sullo stato patrimoniale, finanziario ed economico dell'impresa. L'impresa è un'entità distinta dai proprietari o dei suoi azionisti. I soggetti interessati al bilancio sono esterni all'impresa (finanziatori, enti di previdenza e assistenza, il fisco, lo Stato) e interni all'impresa (portatori di capitali di rischio, proprietari, azionisti (*shareholder*), management aziendale e dipendenti).

— Lo scopo del bilancio è quello di fornire una periodica e attendibile conoscenza, secondo principi contabili corretti, del risultato economico conseguito nell'esercizio (**Conto economico**) illustrante le componenti attive (ricavi) e passivi (costi) del reddito. Deve essere effettuata una corretta valutazione e composizione della situazione patrimoniale (**Stato patrimoniale**) dell'impresa e della sua situazione finanziaria, avendo cura di suddividere attività e passività in aggregazioni che tengano conto della loro esigibilità. Deve essere data una corretta informazione sulle scelte operate nella stesura del bilancio (**Nota integrativa**) affinché lo stesso possa svolgere la sua funzione di mezzo informativo patrimoniale, finanziario ed economico dell'impresa.

— Il bilancio di esercizio deve essere redatto basandosi sui principi che seguono: principio della chiarezza; rappresentazione veritiera e corretta; informazioni complementari per attuare i due punti precedenti; prevalenza degli aspetti sostanziali su quelli formali, quindi deroghe in casi eccezionali per rendere veritiero e corretto il bilancio; competenza, l'effetto delle operazioni e degli altri eventi deve essere contabilizzato e attribuito nell'esercizio cui tali eventi si riferiscono e non quando si concretizzano i pagamenti e gli incassi; neutralità, cioè imparzialità, il bilancio deve essere preparato per una moltitudine di destinatari e quindi si deve basare su principi contabili indipendenti senza servire interessi particolari.

— Per rilevare correttamente le operazioni aziendali è necessario seguire alcuni principi e regole che sono legate al metodo della **partita doppia**. Con questo metodo si verifica la costante uguaglianza fra addebitamenti e accreditamenti nei diversi conti utilizzati. Ogni operazione può essere osservata da un duplice aspetto:

– l'aspetto finanziario che misura in termini monetari l'ammontare dell'operazioni;
– l'aspetto economico che rappresenta l'aspetto derivato, in quanto il costo, il ricavo o la variazione del patrimonio netto avviene misurando la variazione finanziaria.

La contabilità generale fornisce informazioni generali sull'azienda, tali informazioni sono rivolte all'esterno dell'azienda e interessano ai creditori, ai fornitori, al fisco, ai finanziatori. Ma un'ulteriore elaborazione dei conti, che presti attenzione a un prodotto o a una linea di prodotti, permette di fornire informazioni utili all'azienda per elaborare le sue strategie di produzione e di vendita.

— La capacità di calcolare esattamente il costo del prodotto e di eliminare gli sprechi è alla base del successo aziendale. Il primo costo da calcolare è il costo diretto di natura industriale. Bisogna valutare attentamente il processo di trasformazione quantificando le materie prime impiegate e il costo della manodopera. Questo costo è detto **costo primo**. A questo si devono aggiungere i **costi indiretti** di produzione, che per loro natura non sono imputabili direttamente al prodotto. Alla somma dei costi diretti e indiretti industriali si devono ora aggiungere i **costi di natura non industriale**, cioè quelli non legati al processo di trasformazione, quali i costi di amministrazione, commerciali, finanziari; le imposte; le tasse ecc. Si ottiene così il **costo complessivo** (o **costo pieno**).

— L'analisi dei costi consente all'azienda di valutare la convenienza economica a produrre un certo prodotto, cioè si vuole sapere quanti prodotti dovranno essere realizzati e venduti perché l'impresa non subisca una perdita.
Questa analisi porta alla determinazione del cosiddetto **punto di pareggio** (BEP-Break Even Point) che individua la quantità di prodotto venduto in corrispondenza del quale i costi uguagliano i ricavi. L'analisi può essere condotta per via algebrica o grafica.
Le aziende industriali hanno, rispetto alle imprese commerciali, costi fissi elevati (macchinari, stabilimenti ecc.) per cui, in caso di riduzione dei ricavi (minore inclinazione della curva dei ricavi totali) e quindi spostamento del punto di pareggio verso destra, hanno maggiori difficoltà a compensarlo con una riduzione dei costi fissi e in genere subiscono perdite.

— La convenienza della produzione di singoli prodotti viene valutata calcolando un indice detto **margine lordo di contribuzione** (MLC), tale margine si calcola sottraendo dai ricavi di vendita i costi variabili.

CAPITOLO 28

Il **marketing** è il modo di concepire e mettere in pratica, in funzione dei bisogni attuali o potenziali del consumatore e delle strutture di mercato, l'insieme di attività che hanno per oggetto: la creazione e l'adeguamento di prodotti e servizi; la strategia commerciale; la messa in opera dei mezzi necessari per l'applicazione di questa strategia.

— Il marketing per i prodotti di largo consumo e per quello dei prodotti per l'industria è sostanzialmente analogo, quello che cambia sono i mezzi. I prodotti per l'industria non necessitano di tecniche troppo aggressive o dirette di vendita, come invece accade per i prodotti di larga diffusione.

— Nei rapporti dell'impresa con il suo mercato, essa è sottoposta all'azione di un gran numero di agenti

influenzanti che le forniscono suggerimenti specialistici che l'aiutano a prendere una decisione corretta. Nella scelta è dunque necessario tener conto dei rapporti che possono accelerare la scelta o ritardarla. Le influenze possono essere all'interno dell'azienda ma anche all'esterno, per esempio, installatori, esperti, consulenti ecc. All'interno dell'azienda l'**acquirente che prenderà la decisione finale** è soggetto all'influenza di tutti coloro che direttamente o indirettamente sono interessati all'acquisto. Alcuni manifesteranno interesse ai temi commerciali altri agli aspetti tecnici e altri all'incidenza finanziaria. Questi parametri talvolta in contrasto fra loro sono tutti importanti e bisogna tenerne conto.

— Le imprese che realizzano prodotti per l'industria hanno sbocchi commerciali ridotti, hanno una clientela ristretta che possono perdere se un concorrente offre dei prezzi più bassi. L'innovazione tecnologica può rendere obsoleti certi materiali o apparecchiature che fino a poco tempo prima erano considerati modernissimi. La risposta dell'impresa deve essere un continuo adattamento che si esprime con il lancio continuo di nuovi prodotti che corrispondano realmente con le necessità del momento.

— La vendita è la risultante di un insieme di azioni: il **prodotto** (product), il **prezzo** (pricing), la **marca** (branding), la **distribuzione** (distribution), la **pubblicità** (adversing), la **promozione vendite** (sales promotion).

La promozione vendite è un insieme di tecniche che vanno a completare le vendite e la pubblicità a che incitano l'utilizzatore ad acquistare e il dettagliante ad essere più efficiente con azioni limitate nel tempo e nello spazio che generano un vantaggio supplementare. Il processo di acquisto nel mercato dei prodotti industriali, come si è già detto, è molto lento per cui il compito della promozione vendite è quello di ridimensionare le idee preconcette e le esitazioni di ogni genere.

Un approccio iniziale suggerirebbe di attivare procedure di incentivazione che operino su tutti i soggetti interessati, forza di vendita, esperti, installatori, intermediari, utilizzatori, ma ciò è possibile solo in teoria in pratica le risorse a disposizione (budget) sono limitate per cui solo alcune azioni possono essere intraprese e si dovranno perciò fare una scelta gerarchica attribuendo alcune priorità.

— Ogni livello di commercializzazione ha una sua precisa responsabilità; il ruolo del fabbricante è di produrre un bene di qualità; il dettagliante ha il ruolo di assicurarne la diffusione agli utenti finali; le difficoltà nascono quando gli intermediari non svolgono la loro attività in modo efficace. La promozione vendite obbliga gli uni e gli altri ad assumersi forti responsabilità e a migliorare i rispettivi risultati.

Le tecniche di promozione vendite più utilizzate sono: le riunioni a scopo informativo, i viaggi di studio, le visite agli stabilimenti, le visite alle installazioni, i centri di informazione aperti al pubblico, la pubblicità diretta, le équipe di promotori, la documentazione, la dimostrazione, le fiere-mostra, la pubblicità sul luogo di vendita, la presentazione.

— Le tecniche e le azioni che favoriscono il **lancio dinamico del prodotto** sono: la distribuzione di campioni del prodotto, la possibilità di effettuare la prova del prodotto, l'utilizzo di tagliandi sconto, l'offerta di progetti di installazione.

Le **azioni di sviluppo** vengono effettuate per convincere il cliente potenziale ad effettuare il primo acquisto, esse sono: il premio, il servizio, la riduzione del prezzo, le operazioni di "resa", i giochi e i concorsi, gli abbinamenti ecc.

Le azioni di supporto sono azioni che l'azienda mette in atto, esse sono: le manifestazioni, le operazioni pubblicitarie, le attività di animazione sul punto vendita, i regali, le associazioni, i premi.

CAPITOLO 29

L'impresa deve conoscere i requisiti del cliente, le sue aspettative in modo tale da sviluppare processi organizzativi che siano in grado si produrre merci e servizi adatti allo scopo: ciò le permette di progettare un sistema organizzativo orientato alla ricerca della **qualità**. La qualità coinvolge innanzitutto il personale dell'impresa, pertanto è compito del management ottenere la consapevolezza del bisogno della qualità e far sì che tale propensione divenga il patrimonio dell'azienda e il motore motivante del continuo miglioramento dell'attività aziendale. L'impresa deve operare anche in modo socialmente responsabile.

— Il sistema qualità per poter essere certificato deve essere implementato rispettando le norme emesse dall'ISO (International Organization for Standardization). Le norme di riferimento sono le **ISO 9001:2008**. L'efficienza del sistema di qualità determina l'aumento della qualità del prodotto, o del servizio, proposto al mercato e la riduzione dei costi e, in qualche caso, dei prezzi, produce una serie di benefici e di effetti in termini economici come: l'aumento della quota di mercato, del fatturato e della redditività degli investimenti. La semplice applicazione delle prescrizioni contenute nelle norme non garantisce il raggiungimento della qualità, ma è richiesto l'intervento di un apposito organismo di certificazione e di ispezione.

— La **certificazione** è l'atto finale con cui un organismo di certificazione terzo rispetto l'impresa esamina e certifica la conformità alle norme prescelte dei manuali della qualità e delle conseguenti organizzazioni strutturali e di controllo, di trattamento delle non conformità e di registrazione della qualità posta in essere. Ottenuta la certificazione l'impresa ottiene la licenza d'uso di un apposito **marchio**.

MODULO N VERIFICHE

1.
Quali soggetti sono interessati a conoscere le informazioni contenute nel bilancio d'esercizio di un'impresa?

2.
Quali sono i principi su cui si deve basare la redazione del bilancio di esercizio di un'impresa?

3.
Che cos'è il capitale netto di un'impresa?

4.
Qual è la funzione della contabilità analitica?

5.
Come si determina il costo di un prodotto?

6.
In quale circostanza un'azienda può trovare conveniente continuare la produzione di un prodotto che non genera ricavi tali da coprire i costi che provoca?

7.
Quali sono le principali motivazioni all'acquisto che permettono di evidenziare i punti chiave che determinano l'acquisto di una marca di prodotti industriali?

8.
Le medie e piccole industrie mancano di dinamismo in quanto presentano alcuni fattori negativi. Quali?

9.
Le medie e piccole industrie presentano però anche caratteristiche positive. Quali?

10.
La vendita è la risultante di un insieme di azioni. Quali?

11.
Nel processo di commercializzazione di un prodotto quali sono le reciproche responsabilità e i ruoli del fabbricante e del dettagliante?

12.
Quali sono le tecniche di promozione vendite più utilizzate per incrementare le vendite di prodotti per l'industria?

Indice analitico

A

Accertamenti
– periodici 437
– preventivi 437
Acquisizione/esecuzione di un'istruzione 367
Addetto del servizio di prevenzione e protezione (ASPP) 436
Affidabilità 336
Albero decisionale RAEE 405
Alimentatore 263
– a commutazione (switching) 280-286
– a regolazione parallela 269
– duale 288
– lineare 263-268
– stabilizzato monofase 263-268
Amplificatore 51,59
Altoparlante 191,192
AND/OR array 210
Angolo
– di conduzione 89
– di innesco 87
– di osservazione 103
– elettrico 166
– meccanico 166
Apparecchiature elettriche ed elettroniche (AEE) 402,407,410
Apparecchiature di sorveglianza 408
Architettura
– Harward 367
– PIC16F628 365
– PIC1F877 391
Area di sicuro innesco 72
ASIC 207
Assegno per il nucleo famigliare 428,429
Azionamento
– a mezzo passo 182
– di un motore a corrente continua 170,176,177
– di un motore a c.a. a induzione asincrono 87-94
– di un motore passo-passo 188
Azioni
– di lancio 493-495
– di supporto 497,498
– di sviluppo 495-497
– promozionali 490-493
Aspetti fiscali della retribuzione 431,432

B

Black box 408
Buzzer 192

C

Cablaggio 345-348
Cadmio 401,411
Camere di Commercio 407
Campionamento del segnale 306,317,318
Campo
– di risposta 185
– di variazione della frequenza 320
– magnetico rotante 177
Capitale netto 464
Cassa integrazione guadagni 429,430
Cavo autoestinguente 341
CEI 351
Cella
– fotovoltaica 138
– solare 139
Celle standard 217
Centro di coordinamento 442
Cessazione del rapporto di lavoro 432,433
Chip 196
Circuito di condizionamento del segnale 50
Circuiti integrati
– full-custom 206
– per applicazioni specifiche (ASIC) 207
– semicustom 207
Chiavette elettroniche 408
Codice
– della privacy 452-456
– di sblocco personale (PUK) 408
Coefficiente
– di Poisson 13
– di sicurezza 337
Collaudo di un'apparecchiatura elettronica 338-340
Collegamento di massa 338
Commutatore 165
Comparatori analogici 374-376
Compilatore di silicio 215
Contabilità 463-465,474,475
Contatore di programma 371
Conto
– economico 462,465,467,473
– finanziario 466
Contratti di lavoro
– apprendistato 418
– associati in partecipazione 420,421
– a chiamata 419
– a intermittenza 419
– a progetto 419
– a tempo determinato 416
– a tempo indeterminato 415,416
– collaborazione con partita Iva 419
– di inserimento 418
– in somministrazione 417
– iterinale 417
– part-time 417
– socio di cooperativa 420
– stage 420
– tirocinio formativo 420
Controllo
– a treno d'onda 94
– della rotazione di un motore passo-passo 182-185
– di fase 87
– segnali di 311
Convertitore
– monolitico 287-289
– a bilanciamento di carica 319
– a rampa e soglia 319
– analogico/digitale (A/D) 312-318
– A/D a integrazione 313,314
– A/D ad approssimazioni successive 312,313
– A/D parallelo 314,315
– digitale/analogico (DAC) 307-311
– frequenza-tensione (FVC) 320,321
– tensione-frequenza (VFC) 318-320
Coppia
– di saturazione 177
– di spunto 177
– di tenuta 185
– massima 177
– motrice 163
– nominale 177
– residua 185
– resistente 186
Coppie polari 166
Corrente
– anodica 79
– di aggancio 71
– di buio 136
– di coda 85
– di eccitazione 162
– di fuga 70,80
– di innesco 81
– di mantenimento 67,69,71,190
– di sgancio 178
– di spunto 178
– di soglia 125,129
– di trigger 80
– inversa 69
Costi 475-477
Costo del prodotto 477
Cromo esavalente 411

D

DC/DC 286
– convertitore 286-289
DIAC 77
Dimensionamento di un dissipatore di calore 296,297
Dinamo tachimetrica 25,171
Diodo laser 120-132
Diritto
– di assemblea 424
– di sciopero 426,427
Display
– a cristalli liquidi (LCD) 109-118,401
– a led 107-109
– a plasma 119,120
– a scarica 118-120
– fluorescenti 118,119
Dispositivo a mascheratura 207
Dispositivi di protezione individuale (DPI) 439,440
Dissipazione del calore 342,343
Documentazione
– di un'apparecchiatura elettronica 349-351
– di valutazione dei rischi 436
Documento programmatico della sicurezza (DPS) 456
Doveri dei lavoratori 438,439
Driver di potenza 174

E

e-waste 401
Eccitazione dei motori in c.c. 164,165
EEPROM 382,383
Effetto
– Doppler 43
– fotovoltaico 134
– Hall 28
– Peltier 37
– Seebeck 37
– termoelettrico
Efficienza 101,139
Elettromagneti 189,190
Emissione
– spontanea 121
– stimolata 121
Encoder 15-22
EPAL 213
EPLD 213
Errore
– di calibrazione 321
– di guadagno 4,309,316
– di linearità 4,310,316,321
– di non monotonicità 310
– di offset 5,309
– di omissione di codice 316
Estensimetro 14,15
Eterogiunzione 125

F

FAMOS 213
Fattore
– di gauge 13
– di ripple 265
Filtro 266
Flash
– converter 314
– memoria 360
Fold-back 271
Fotoaccoppiatori 146-153
Fotodarlington 143
Fotodiodi 131,134-137
Fotone 99
Fotoresistenza 133
Fotoscr 144
Fototiristore 144,145
Fototransistor 20,141-143
Fototriac 145
Frequenza
– di clock 385
– di switching 289
Funzione
– di conversione 7
– di trasferimento 3,4
Fusibile 208

G

Gauge factor 13
GAL 213
Gate array 215
Grado
– di protezione IP 335
– di rigidità della struttura aziendale 480
GTO 83-86

I

Imposta sul reddito delle persone fisiche (Irpef) 428
IMQ 351
Inail 430,431,433
Incendio 444-448

Inps 428
Incertezza di apertura 317
Indennità di malattia 429
Indirizzamento
– diretto 372
– indiretto 371
Iniettore dei portatori minoritari 134
Interferometro di Fabry-Pérrot 122
Inversione di popolazione 122

L

Led 99-106
– illuminazione a 106,107
Libertà sindacale 424
Libro giornale 470,472
Limiti
– meccanici 335
– termici 335
Lunghezza d'onda 101

M

Mansioni del lavoratore 423,424
Marcatura dei prodotti 409
Margine di contribuzione unitaria 480
Marketing 481
Maternità 429
Mercurio 401,411
Medico competente 436,437
Metodo
– di cablaggio 343-345
– potenziometrico 52
Messa in sicurezza 337
Microcalcolatore 360
Microcircuiti 196-198
Microfono 190,191
Misure minime di sicurezza 452,453,455,456
Mobbing 451,452
Modulazione di impulsi (PWM) 168,172,173,281,377, 380-382
Modulo
– Capture/Compare/PWM 377,390
– convertitore analogico/digitale 391
Moltiplicatore di tensione 287
Motore elettrico 160
– in corrente continua 162-176
– in corrente alternata 177-181
– monofase a induzione 179-181
– monofase asincrono 177-179
– lineare 181
– senza spazzole (brushless) 165-168
– sincrono 179,180
– universale 180,181
Motore elettrico passo-passo 181-188
– a riluttanza variabile 184
– a magnete permanente bipolare 182,183
– a magnete permanente unipolare 184
– circuiti di pilotaggio per 188
– ibrido 184,185

N

Nota integrativa 462

O

Ondulazione residua 265

P

Package 196
PAL 208-210
Pannello solare 139
Parola di configurazione 385
Partita doppia 466
Parzializzazione della forma d'onda 87
Passo angolare 181,185
Password di sblocco (PIN) 408
PEEC 360
Piano di emergenza 441-445
PIC16F628 364-389
PIC16F877 390-395
Pilotaggio a chopper 188
Piombo 401,410
PLA 208-210
PLD 211-214
Pompaggio ottico 123
Portata dinamica 319
Ponte
– di Graetz 265
– estensimetrico 14
– di Wheatstone 14,53,54
Port di I/O 372,373
Portale SISTRI 408
Potenza dissipata 73
Potere risolutivo 309,315
Power-on reset (POR) 390
Precisione della conversione 308,315
Preventivo di costo 354
Prezzo di vendita 353-355,477,478
Procedure di evacuazione 442,443
Profitto normale 354
Progetto modulare a schede 348,350
Programmazione
– a bassa tensione (LVP) 362,363,387,388
– ad alta tensione (HVP) 362,363,387,388
– dei PLD 219-253
– ICSP 384,387
– seriale 362
Promozione vendite 487-499
Pronto soccorso aziendale 448,449
Prova
– della reazione al fuoco 339
– sul modello 338
– sul prodotto finito 339
– sul prototipo 338,339,345
– sulle applicazioni militari 339
Punto di pareggio (BEP) 479

Q

Qualità 499
Quantizzazione 3,306
Quarzo piezoelettrico 385,386

R

RAEE 401-408
Rapporto
– di trasferimento di corrente (CTR) 146
– prestazione-costo 343
Rappresentanza sindacale aziendale (RSA) 425
Rappresentante dei lavoratori per la sicurezza (RLS) 434,437,438
Registro
– di sistema 367
– di uso generale 368,369
– del PIC16F628 365,367-369
– del PIC16F877 390,395
– nazionale dei soggetti obbligati allo smaltimento dei RAEE 405,407,408
Regola della mano sinistra 161
Regolatore di tensione 268
– a 3 terminali 274-277
– a 4 terminali 274
– a circuiti integrati 274-280
– a commutazione 280-286
– a corrente costante 269
– a incremento 281
– a riduzione 281
– di tipo parallelo 269
– di tipo serie 270,271
– multiterminale 278-280
Regolazione
– di carico 268,274
– di linea 268,274
Regolazione dei motori
– brushless 174-176
– in c.c. 168-174
Relè allo stato solido (SSR) 145
Rendimento 102,130,134
Responsabile della sicurezza prevenzione e protezione (RSPP) 436
Ricerca del guasto 339,340
Rifiuti RAEE 402-408
Rimborso delle spese di viaggio 431
Ripple 25,265
RISC 365,390
Rischio 351-353
Risoluzione 3,306,315
Risposta in frequenza 5
Rotore 160,162,165
RTD 34,35

S

Sanzioni 407,408,439
Scorrimento nei motori sincroni 179
SCR 67-76
Segnaletica di sicurezza 448
Sensibilità 315
Sensore 2
– a effetto Hall 27,28
– a fibre ottiche 44,45
– bimetallico 33
– di combustione 45,46
– di fiamma 48
– di flusso 41-48
– di gas 45-48
– di pressione 31,32
– di prossimità 27-31
– di sforzo 12
– di temperatura 32-38
– di tipo capacitivo 9-10
– di tipo induttivo 11,12
– di tipo resistivo 7-9
– eccitazione di un 51
– intelligente 48-50
Sistema
– di comunicazione 442
– di gestione dei RAEE 402-408
Slew range 186
Sonda lambda 45
Squadra di emergenza 442,445-448
Stabilità 337
Stati macchina 238
Stato patrimoniale 462,473
Statore 160,162,165
Statuto dei lavoratori 422
Studenti lavoratori 423

T

Tempo
– costante di 6
– di commutazione 65,81
– di conversione 315
– di discesa 136
– di innesco 73
– di multiplexing 117
– di risposta 113,321
– di ritardo 73
– di salita 73,136
– di spegnimento 73
– di stabilizzazione 309
Tensione
– di breakdown 67
– di breakover 67,70,77
– di dropout 274
– di isolamento 146
– di riferimento 377
– di soglia 81
– gradiente di 308
Teorema del campionamento 317
Termistore 33,34
Termocoppia 33,36,38
Timer 373,374
Tiristori 67
Transistor
– bipolari in commutazione 61-64
– MOS in commutazione 65
Trasduttore 2
– attivo 3
– capacitivo 9,10,41
– classificazione del 2
– costante di tempo del 5
– di accelerazione 23-25
– di forza 12-15
– di flusso 41-43
– di livello 39-41
– di posizione 7-22
– di pressione 31,32
– di temperatura 32-38
– di velocità 23-25
– induttivo 11
– linearità del 4,51
– Mems 26,27
– passivo 3
– precisione del 4
– ripetibilità del 4
– risoluzione del 3,17
– sensibilità del 4,28
– tempo di risposta del 5,6
Trasformatore differenziale (LVDT,RVDT) 11,12
Trasmettitore 51
Trattamento
– dati 454,455
– di fine rapporto lavoro (TFR) 428,433
Triac 78-83
TUSL 434
Tutela dei lavoratori 422
Tutele sindacali 424,425

V

Valutazione dei costi 353-355
Velocità
– di sincronismo 177,179
– di variazione della tensione critica (dv/dt) 74,87,88
– di variazione della corrente critica (dI/dt) 74
Vendita dei prodotti 486,487

W

Watchdog (WDT) 390

e-ISBN 978-88-203-5375-9

www.hoepli.it

Ulrico Hoepli Editore S.p.A.
via Hoepli, 5 - 20121 Milano
e-mail hoepli@hoepli.it